

JOCELYN LOPES DE SOUZA

**ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS (K, U e Th)
DA QUADRÍCULA DE ARARAS (SP) E SUAS RELAÇÕES
COM PROCESSOS PEDOGENÉTICOS
E FERTILIZANTES FOSFATADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-
Graduação em Geologia, Área de Concentração
Geologia Ambiental, Departamento de Geologia,
Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal
do Paraná.

Orientador Principal:

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

Co-orientadores:

Prof. Dr. Helio Olympio da Rocha

Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt

CURITIBA

1998

EE-106

TERMO DE APROVAÇÃO

JOCELYN LOPES DE SOUZA

Anomalias aerogamaespectrométricas (K, U e Th) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatados

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:


Presidente: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira


Prof. Dr. Luiz Cláudio de Paula Souza


Profa. Dra. Leila Soares Marques

Curitiba, outubro de 1998.

Dedico aos meus pais Gabriel Lopes de Souza, (*in memoriam*) e Vera Lúcia Faga como o cumprimento de mais uma etapa de minha vida.

E a meu marido, ofereço por todo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Professor Dr. Francisco José Fonseca Ferreira, por orientar-me, iluminando o caminho a ser percorrido na realização da presente pesquisa e dar-me a oportunidade de conviver com a sua fantástica capacidade científica e de relacionamento humano. Sinceramente agradeço, caro professor.

Ao Professor Dr. Helio Olympio da Rocha, do Departamento de Solos da UFPR, pela sua orientação, credibilidade e ensinamentos, fico eternamente grata.

Agradeço o Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt do Departamento de Geologia da UFPR pela orientação.

Ao Professor Dr. Luiz Cláudio de Paula Souza da Universidade Federal do Paraná, pela ajuda no geoprocessamento e ensinamentos durante a realização desta pesquisa, bem como aqueles provenientes do período de graduação do curso de agronomia da UEPG, em que não tive a oportunidade de agradecer.

Ao Professor Dr. Luiz Eduardo Mantovani, pela participação nos trabalhos científicos publicados durante este período, e pela sua gentileza de participar e fornecer estadia durante a campanha a campo.

A gentileza e credibilidade fornecidas pelos pesquisadores Vandir de Azevedo Gouvea e Vicente de Paula Melo do Serviço de Proteção Radiológica (SPR), do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pela realização das análises radioquímicas de urânio e tório em amostras de solos e fertilizantes.

À Professora Dra. Patrícia Peralta, do Departamento de Geografia da UFPR, agradeço a oportunidade da divulgação da nossa pesquisa, brasileira, à Universidade de Reading (Inglaterra).

Agradeço o Professor Dr. Elias Carneiro Daix do Curso de Geologia de Rio Claro, pela valiosa contribuição na saída a campo.

Ao Engenheiro Agrônomo Flávio Guerreiro pelas suas opiniões e observações, grata pela sua imparcialidade.

Aos amigos da Pós-Graduação, em especial aos geólogos Giane Girardi Artur, e Aldo Maffei, ao oferecer seus preciosos tempos em forma de calor humano. Agradeço os colegas geólogos Andréia E. Kertscher, Elisabeth do Rocio, João Bosco, João Nogueira Filho, Kátia Siedelecisk, Maria Cristina de Souza, Rodoilton Stevanato, bem como a Engenheira

Cartógrafa Selma Aranha, o desenhista Oto Laurentino Rosa pelos ensinamentos em CAD e a geóloga Leila Perdocin, pela estadia em Rio Claro.

Aos funcionários da FUNPAR, Geólogo Maximilian Forlin e Geofísico Francisco Valdyr da Silva, pelo tempo desprendido e colaboração no pré-processamento dos dados geofísicos realizados no Laboratório de Processamento de Dados Geológicos, do Departamento de Geologia da UFPR.

À Edson da Silva Lima Jr., secretário do Curso de Pós-Graduação em Geologia UFPR, pela amizade e força. Agradeço também a Rosalda de Barros e Neimar de Souza.

À querida amiga Hemaira Igneis Ribeiro, pelo seu inestimável senso de solidariedade, sempre presente nas horas em que sozinha me encontrei. Agradeço de coração a sua percepção.

E como nada ocorre isolado, agradeço meu amigo Renato Nadal (Zen), pela ajuda na versão para a língua inglesa.

Aos funcionários do Laboratório de Análises de Solos, do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Aldair e Regina Célia, pela ajuda durante a realização das análises de digestão total dos solos.

Ao funcionário Luiz Carlos Zem do Laboratório de Mineralogia (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR, obrigada pela colaboração.

Agradeço a CAPES, pelos dois anos e meio de bolsa concedida.

E finalmente, ao Curso de Pós-Graduação em Geologia da UFPR, pelo respeito e oportunidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Localização da área e vias de acesso	1
1.2 Organização do trabalho	2
2 FUNDAMENTOS DO MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO	5
2.1 Introdução	5
2.2 Radioatividade básica	6
2.2.1 Diferentes tipos de radiação	6
2.2.1.1 Raios gama	7
2.2.1.1.1 Interação da radiação gama com a matéria	7
2.2.2 Decaimento radioativo	9
2.2.3 Séries radioativas	12
2.2.4 Equilíbrio radioativo	17
2.2.5 Propriedades do espectro aéreo da radiação gama	19
2.2.6 Unidades	22
2.3 Detetores	23
2.4 Fatores que afetam as medidas aerogamaespectrométricas	25
2.4.1 Radiação do <i>background</i>	25
2.4.1.1 Gás radônio	26
2.4.1.2 Radiação cósmica e <i>background</i> da aeronave	27
2.4.2 Efeito Compton	28
2.4.3 Correção altimétrica	30
2.4.4 Tempo morto	30
2.4.5 Conversão para concentração	31
2.4.6 Efeitos ambientais	32
2.4.7 Outros fatores	33
3 GEOQUÍMICA E DISTRIBUIÇÃO DOS RADIOELEMENTOS	34
3.1 Introdução	34

3.2 Urânio.....	34
3.3 Tório.....	37
3.4 Potássio.....	39
3.5 Rádio.....	39
3.6 Distribuição dos radioelementos nas rochas.....	40
3.7 Distribuição dos radioelementos nos solos.....	44
4 RADIOATIVIDADE EM FERTILIZANTES.....	54
4.1 Introdução.....	54
4.2 Radionuclídeos em jazidas fosfáticas.....	54
4.3 Radionuclídeos em fertilizantes.....	56
4.4 Contribuição dos radionuclídeos ao meio ambiente.....	70
4.5 Radionuclídeos em redes de drenagem.....	77
5 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA.....	80
5.1 Introdução.....	80
5.2 Magnetismo dos materiais.....	81
5.3 Medidores de susceptibilidade.....	84
5.4 Susceptibilidade de rochas e minerais.....	84
6 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA.....	87
6.1 Geologia.....	87
6.2 Solos.....	90
6.2.1 Latossolos.....	90
6.2.1.1 Latossolo Roxo.....	92
6.2.1.2 Latossolo Vermelho-Escuro.....	93
6.2.1.3 Latossolo Vermelho-Amarelo.....	94
6.2.2 Podzólico Vermelho-Amarelo.....	94
6.2.3 Terra Roxa Estruturada.....	95
6.2.4 Areias Quartzosas.....	96
6.2.5 Cambissolos.....	96
6.2.6 Solos Litólicos.....	96
6.2.7 Solos Hidromórficos.....	97
6.2.8 Associação de solos.....	97
6.3 Formações superficiais.....	100
6.4 Uso agrícola do solo.....	102

7 MATERIAIS E MÉTODOS	104
7.1 Materiais utilizados	104
7.2 Geoprocessamento	105
7.2.1 Pré-processamento dos dados aerogamaespectrométricos	106
7.2.2 Construção da base digital de dados	107
7.2.3 Processamento digital de imagens	116
7.2.3.1 Filtragem	116
7.2.3.2 Composição colorida	118
7.2.3.3 IHS	118
7.2.3.4 Classificação	119
7.2.4 Integração dos dados	120
7.3 Análises químicas	121
7.3.1 Digestão total do solo com ácido fluorídrico (HF) e ácido perclórico (HClO ₄)	121
7.3.2 Análise química de rotina de solos	121
7.3.3 Análise física de solos	122
7.3.4 Análise radioquímica	122
7.4 Trabalhos de campo	122
7.4.1 Materiais e equipamentos	122
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	124
8.1 Geoprocessamento	124
8.2 Resultados radioquímicos	142
8.2.1 Amostras de solos	142
8.2.2 Amostras de fertilizantes	148
8.3 Gamaespectrometria terrestre e susceptibilidade magnética	150
9 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	194
ANEXO I - DIGESTÃO TOTAL	198
ANEXO II - ROTINA DOS SOLOS	200
ANEXO III - FÍSICA DOS SOLOS	202
ANEXO IV - RADIOQUÍMICA	204
ANEXO V - VINHAÇA	206
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211

LISTA DE FIGURAS

1 Localização da sub-área 6 do Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro.....	3
2 Localização e vias de acesso.....	4
3 Diagrama esquemático das interações da radiação gama com a matéria.....	8
4 Interação dos raios gama com a matéria.....	9
5 O espectro eletromagnético e suas principais fontes de radiação.....	11
6 Janelas-padrão utilizadas em levantamentos aerogamaespectrométricos.....	19
7 Linhas espectrais do K (a), do U (b), do Th (c) e simulação do fluxo de raios gama a 300 m de altura do K (d), do U (e) e do Th (f).....	21
8 Esquema de um detetor NaI(Tl) de raios gama.....	24
9 Representação esquemática das interações entre as janelas do K, U e Th.....	29
10 Ciclo de interações do U^{+4} e do U^{+6} na natureza.....	36
11 Ciclo de interações do Th^{+4} na natureza.....	38
12 Variação nos teores de urânio em algumas rochas sedimentares.....	41
13 Média de U e Th (ppm) em rochas vulcânicas da Bacia do Paraná.....	42
14 Variações nos teores médios de K, U e Th de rochas ígneas com o aumento do teor de Si.....	43
15 Diagrama dos fatores que afetam o balanço da denudação na paisagem e suas respostas aerogamaespectrométricas.....	46
16 Relação entre as respostas de raios gama, tipos de solo/regolito e processos geomórficos.....	47
17 Respostas dos raios gama em relação ao intemperismo e a deposição.....	48
18 Diagrama dos fatores que afetam as respostas dos raios gama sobre o mesmo tipo de material de origem.....	49
19 Mobilidade dos principais elementos e respostas dos raios gama.....	50
20 Distribuição de K, U e Th em um perfil de solo sobre diorito.....	52
21 Variações nas concentrações de K, U e Th durante o intemperismo de basalto.....	53
22 Momento magnético.....	82
23 Domínios de materiais ferromagnéticos.....	83
24 Esquema de operação de um susceptímetro.....	84

25 Susceptibilidade magnética em rochas.....	86
26 Mapa geológico da Quadricula de Araras.....	89
27 Mapa de solos da Quadricula de Araras.....	99
28 Mapa de formações superficiais da Quadricula de Araras.....	101
29 Mapa de uso agrícola da Quadricula de Araras.....	103
30 Caminho percorrido pelas diferentes fontes de dados.....	106
31 Estrutura dos dados no ambiente SGI/SITIM.....	109
32 Esquema do cruzamento de dados de formações superficiais.....	111
33 Processo de modelamento de superfícies.....	115
34 Esquema janela-móvel para filtragem (a) e tipos de filtros direcionais (b).....	117
35 Perfis gamaespectrométricos terrestres e de susceptibilidade magnética.....	123
36 Integração das variáveis espaciais.....	125
37 Composição colorida R (K), G (U) e B (Th).....	127
38 <i>Clusters</i> da composição colorida (a) e <i>layer</i> aluviões do Quaternário adicionado ao <i>cluster</i> K e Th (b).....	128
39 Modelo de elevação digital do terreno (MDT).....	130
40 MDT filtrado e com <i>layer</i> drenagem.....	130
41 Modelo digital do terreno em perspectiva.....	131
42 Imagens de 8 bits do K, do U e do Th.....	134
43 Classificação das anomalias aerogamaespectrométricas de K, U e Th.....	136
44 Classes de solos com anomalias ($>x + 3s$) de K (a), U (b) e Th (c).....	137
45 MDT e layers anomalias ($>x + 3s$) de U e K.....	138
46 Imagens aerogamaespectrométricas de K (a), U (b) e Th (c) integradas ao relevo.....	139
47 Imagem de 8 bits de U e litologias com granulometria argila e argila e silte da folha de Leme.....	141
48 Comparativo entre a média de U (ppm) de rochas vulcânicas da Bacia do Paraná (Marques, 1988) e a média de U (ppm) dos Latossolos Roxos da presente Pesquisa.....	144
49 Comparativo entre o incremento de U (ppm) rocha-solo da presente pesquisa e U (ppm) rocha-solo estudados por Dickson & Scott (1997).....	146
50 Mapa de solos mostrando os perfis gamaespectrométricos, de susceptibilidade magnética e anomalias de U ($>X + 3s$).....	151
51 Contato <i>Sill</i> -Siltito (a) e Pedreira de Diabásio (b).....	159

52 MDT indicando os perfis e as anomalias de U ($>x + 3s$).....	160
53 Perfil A-B (contagem total).....	168
54 Perfil A-B (potássio).....	169
55 Perfil A-B (urânio).....	170
56 Perfil A-B (tório).....	171
57 Perfil A-B (susceptibilidade magnética).....	172
58 Perfil C-D (contagem total).....	173
59 Perfil C-D (potássio).....	174
60 Perfil C-D (urânio).....	175
61 Perfil C-D (tório).....	176
62 Perfil C-D (susceptibilidade magnética).....	177
63 Perfil E-F (contagem total).....	178
64 Perfil E-F (potássio).....	179
65 Perfil E-F (urânio).....	180
66 Perfil E-F (tório).....	181
67 Perfil E-F (susceptibilidade magnética).....	182
68 Formações superficiais de Araras mostrando os perfis E-F, G-H e I-J.....	183
69 Perfil G-H (contagem total).....	184
70 Perfil G-H (potássio).....	185
71 Perfil G-H (urânio).....	186
72 Perfil G-H (tório).....	187
73 Perfil G-H (susceptibilidade magnética).....	188
74 Perfil I-J (contagem total).....	189
75 Perfil I-J (potássio).....	190
76 Perfil I-J (urânio).....	191
77 Perfil I-J (tório).....	192
78 Perfil I-J (susceptibilidade magnética).....	193

LISTA DE TABELAS

1 Série do decaimento radioativo do ^{238}U	14
2 Série do decaimento radioativo do ^{235}U	15
3 Série do decaimento radioativo do ^{232}Th	16
4 Janelas-padrão utilizadas em levantamentos gamaespectrométricos.....	19
5 <i>Stripping factors</i>	29
6 Teor médio de tório e urânio em algumas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.....	40
7 Teores de radioelementos em rochas da Austrália.....	44
8 Teores de radioelementos de solos derivados de rochas da Austrália.....	51
9 Atividade (Bq/kg) de ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K de principais jazidas fosfáticas.....	55
10 Atividade específica em rochas fosfáticas.....	58
11 Atividade específica em fertilizantes fosfatados.....	59
12 Atividade específica em fertilizantes PK.....	60
13 Atividade específica em fertilizantes NP.....	61
14 Atividade específica em fertilizantes NPK.....	62
15 Radioatividade natural em fertilizantes provenientes de fosfatos da Flórida.....	64
16 Radioatividade estimada presente em fertilizantes fosfatados produzidos nos EUA durante 1974.....	65
17 Concentrações de urânio determinadas por análise de ativação neutrônica (AAN).....	67
18 Concentrações de urânio determinadas por espectrofotometria UV/Visível.....	67
19 Teores de urânio em fosforitas e produtos de seu processamento em fábricas de fertilizantes da Bulgária.....	68
20 Concentrações de urânio em concentrados fosfáticos e fertilizantes brasileiros.....	69
21 Urânio e fósforo em amostras de solos (0 - 23 cm) de três experimentos de Rothamsted (Inglaterra).....	71
22 Urânio (ppm) no subsolo de três experimentos de Rothamsted (Inglaterra).....	71
23 Total de urânio (ppm), fósforo (ppm) e carbono (%), a várias profundidades do solo de Park Grass, Rotamsted no ano de 1976.....	72
24 Teores de urânio (ppm), fósforo (ppm) e carbono (%) das frações leve e pesada do solo de Parkgrass, Rothamsted, coletado no ano de 1975.....	73
25 Total de urânio, fósforo e densidade a três profundidades de solos da Nova Zelândia.....	73

26 Atividade Média dos radionuclídeos por unidade de peso de P em misturas de fertilizantes NPK de várias fábricas da Finlândia.....	75
27 Concentrações de ^{226}Ra em forrageiras desenvolvidas em solos de argilas fosfáticas próximas a áreas de mineração de fosfatos e em áreas não mineradas.....	76
28 Susceptibilidade magnética em minerais.....	85
29 Unidades de solos da Quadricula de Araras - SP.....	91
30 Distribuição espacial dos Latossolos da Quadricula de Araras.....	92
31 Relação das associações cartografadas na Quadricula Araras.....	98
32 Múltiplos da média e desvio padrão de K, U e Th (cps).....	135
33 Resultados analíticos de urânio e tório de amostras de solos e fertilizantes da área de estudo.....	142
34 Dados gamaespectrométricos terrestres (CT_2 , K, U e Th), susceptibilidade magnética (k), geológicos, granulométricos, de solos e de uso do solo do perfil A-B.....	163
35 Dados gamaespectrométricos terrestres (CT_2 , K, U e Th), susceptibilidade magnética (k), geológicos, granulométricos, de solos e de uso do solo do perfil C-D.....	164
36 Fe_2O_3 (%) pelo método da digestão total com H_2SO_4 1:1 das unidades Olaria (PV-3) e Santa Cruz (PV-4).....	164
37 Dados gamaespectrométricos terrestres (CT_2 , K, U e Th), susceptibilidade magnética (k), geológicos, granulométricos, de solos e de uso do solo do perfil E-F.....	165
38 Dados gamaespectrométricos terrestres (CT_2 , K, U e Th), susceptibilidade magnética (k), geológicos, granulométricos, de solos e de uso do solo do perfil G-H.....	166
39 Dados gamaespectrométricos terrestres (CT_2 , K, U e Th), susceptibilidade magnética (k), geológicos, granulométricos, de solos e de uso do solo do perfil I-J.....	167

RESUMO

Fertilizantes químicos são amplamente utilizados em regiões tropicais, especialmente em áreas de grandes culturas, consideradas de abastecimento externo. Geralmente, radionuclídeos estão presentes nas matérias-primas utilizadas para a fabricação de alguns fertilizantes e, conseqüentemente a redistribuição de urânio, tório e potássio pela atividade agrícola pode levar a contaminação dos solos intensivamente fertilizados. Dados aerogamaespectrométricos de K, U e Th provenientes do Projeto São Paulo- Rio de Janeiro, executado pela ENCAL S.A. para a CPRM, entre os anos de 1978-1979, mostraram na Quadricula de Araras (SP), a coincidência entre anomalias aerogamaespectrométricas de K, U, Th e *sills* de diabásio. Esta área está localizada no Estado de São Paulo, situada entre as coordenadas 22° 00'/22° 30' de latitude sul e 47° 00'e 47° 30' de longitude oeste. Como teores de radionuclídeos em rochas básicas são baixos e, levantamentos aerogamaespectrométricos revelam a radiação gama proveniente dos 30 cm da superfície do solo (coincidindo com a camada agricultável), despertou-se o interesse de investigar quais os solos inseridos nas referidas anomalias, bem como qual a atividade agrícola desenvolvida, para se averiguar se a fonte radioativa era oriunda dos fertilizantes químicos utilizados, conferindo assim o principal objetivo da presente pesquisa. O geoprocessamento mostrou-se eficaz na integração dos dados multifonte como: geologia, solos, formações superficiais, drenagem, topográficos, de sensoriamento remoto, aerogamaespectrométrico. Revelou que: as anomalias de U e Th ocorrem sobre Latossolos Roxos massivamente fertilizados com fosfatos, nas porções planas e elevadas do terreno; níveis elevados de urânio estão associados a granulometria argilosa em regolitos desenvolvidos sobre soleiras diabásicas; anomalias de potássio e tório acompanham os aluviões do Quaternário que percorrem as margens do Rio Moji, atribuindo-se às ocorrências de K anômalo, a presença de feldspatos nos solos inseridos, e a ocorrência de Th associada à fertilização local e ao transporte de argilas e óxidos de ferro provenientes das porções mais elevadas do terreno, onde situam-se os Latossolos Roxos sob a cultura de cana-de-açúcar. Análises radioquímicas dos solos e fertilizantes revelaram a ocorrência destes radionuclídeos. Teores de urânio nos solos amostrados mostraram-se superiores aos teores médios indicados pela literatura para solos ditos normais, e superiores aos obtidos em pesquisa sobre acumulação de urânio em solos há mais de oitenta anos fertilizados. As análises radioquímicas de U e Th em fertilizantes foram condizentes com a literatura, observando-se a influência da origem geológica da fonte da matéria-prima utilizada para a fabricação do fertilizante, bem como o aumento nas concentrações de urânio com o teor de P₂O₅ do fertilizante. Entretanto, estatisticamente, os resultados radioquímicos, não podem ser considerados representativos devido ao número reduzido de amostras não condizentes com o tamanho da área (278.865 ha) e acurácia do levantamento aerogamaespectrométrico onde está inserida a Quadricula de Araras. Medidas gamaespectrométricas terrestres mostraram boas relações com as detecções aerogamaespectrométricas. As informações gamaespectrométricas aliadas a detecções de susceptibilidade magnética (k) mostraram que o urânio e o tório tendem a se concentrar em solos oriundos do intemperismo de rochas básicas, mais desenvolvidos, argilosos e com k elevados. A retenção de urânio e tório em solos mais desenvolvidos e com predominância de argilas e óxidos de ferro, aliadas a informações de topografia denotaram contagens gamaespectrométricas destes radionuclídeos maiores do que as encontradas em pedreira de diabásio. Maiores valores de K foram encontrados nos solos aluviais, devido a presença de feldspatos potássicos e micas nos minerais formadores destes solos, bem como pela lixiviação do potássio dos tratos mais elevados, e aqueles do embasamento cristalino, somadas a utilização de fertilizantes potássicos no cultivo de cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Chemical fertilizers are widely used in tropical regions, especially in cash crop areas, which are considered external supply. Generally, radionuclides are present in the raw materials utilized in the manufacturing of some fertilizers and, consequently, the redistribution of uranium, thorium and potassium by agricultural activities may lead to the contamination of intensively fertilized soils. Airborne gamma-ray data on K, U and Th from Project São Paulo – Rio de Janeiro, carried out by ENCAL S.A. for the CPRM between the years of 1978 – 1979, have shown the coincidence of K, U, Th aerogammaspectrometric anomalies and diabase sills in the Araras region (SP). This area is located in São Paulo State, and situated between the coordinates latitude 22° 00' / 22° 30' south and longitude 47° 00' and 47° 30' west. As the contents of radionuclides in basic rocks are low and aerial gamma-ray surveys reveal gamma radiation from the 30cm of the soil profile (coinciding with topsoil), interest has been raised to investigate which soils are included in the anomalies reported, as well as what sort of agricultural activity is carried out, in order to attest whether the source of radioactivity originated from the chemical fertilizers applied, thus establishing the main purpose of the present research. Geoprocessing has shown to be effective in integrating multi-source data such as geology, soils, surface features, drainage, topography, remote sensing, gamma-ray spectrometric. It has revealed that U and Th anomalies occur on *Latossolos Roxos* massively fertilized with phosphates, on the level and elevated parts of the terrain; high levels of uranium are associated with clay particle size in regoliths developed on diabase sills; potassium and thorium anomalies follow Quaternary alluviums which extend along the banks of the Moji river, the occurrence of anomalous K accounting for the presence of feldspars in the included soils, and the occurrence of Th related to local fertilization and to the transport of clays and iron oxides from the uppermost parts of the terrain, where the *Latossolos Roxos* under sugarcane are located. Radiochemical analyses of the soils and fertilizers revealed the occurrence of these radionuclides. Uranium levels in the soils sampled showed to be higher than the average levels reported in the literature for soils called normal, and higher than the ones obtained from research on the accumulation of uranium in soils which have been fertilized for over 80 years. Radiochemical analyses of U and Th in fertilizers were in agreement with the literature, and it has been observed the influence of the geological genesis of the source of the raw material utilized in the production of the fertilizer, as well as the increase in uranium concentrations along with the P₂O₅ content of the fertilizer. Statistically, however, the radiochemical results cannot be considered representative because of the limited number of samples, which were not in accordance with the size of the area (~278,865 ha) and accuracy of the airborne gamma-ray survey where the Araras region is situated. Ground gamma-ray spectrometric measurements have shown good correlation with the airborne gamma-ray detections. Gamma-ray spectrometric data in conjunction with magnetic susceptibility (k) readings have shown that uranium and thorium tend to concentrate in soils originated from the weathering of basic rocks, more developed, of clay texture, and with high k values. The retention of uranium and thorium in more developed soils and with a predominance of clays and iron oxides, in conjunction with topographical data denoted gammaspectrometric readings of these radionuclides higher than the ones found in diabase quarry. Greater values of K have been found in alluvial soils owing to the presence of potassic feldspars and micas in the constituent minerals of these soils, as well as by potassium leaching from the uppermost tracts, and those on the basement, in addition to the utilization of potassic fertilizers in sugarcane cropping.

1 INTRODUÇÃO

Durante a década de 70, levantamentos aerogeofísicos constituíram importantes informações gamaespectrométricas e magnetométricas de grande parte do território brasileiro. Porém, apesar dos referidos aerolevantamentos cobrirem em sua maioria terrenos do Pré-Cambriano, eventualmente segmentos de algumas bacias sedimentares foram incluídos.

Dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos, pertencentes à sub-área 6 do Projeto Aerogeofísico São Paulo-Rio de Janeiro, executado durante os anos de 1978 e 1979 pela ENCAL S.A. - Consultoria e Aerolevantamentos para a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), foram processados por Ferreira (1991). Além do processamento, Ferreira (1991) gerou mapas regionais e procedeu a integração geofísico-geológica, com ênfase nos maciços granitóides e no arcabouço tectônico, de um trato ocidental do Pré-Cambriano do Estado de São Paulo. Entretanto, a referida sub-área envolveu uma região inserida na Bacia do Paraná, a Quadrícula de Araras, a qual revelou a ocorrência de anomalias de U e Th sobre soleiras de diabásio.

Como teores destes radionuclídeos são baixos em rochas básicas e levantamentos aerogamaespectrométricos detectam a radiação gama proveniente dos primeiros 30 (trinta) centímetros da camada superficial do solo, despertou-se o interesse em investigar as referidas anomalias, uma vez que sobre os solos derivados de diabásios, a principal atividade agrícola está representada pelo cultivo de cana-de-açúcar que vem recebendo volumes massivos de fertilizantes fosfatados ao longo das últimas décadas.

Assim, o principal objetivo da presente pesquisa é investigar as anomalias aerogamaespectrométricas de K, U e Th que ocorrem na Quadrícula de Araras, relacionando-as à utilização de fertilizantes químicos pela atividade agrícola local e processos pedogenéticos.

1.1 Localização da Área e Vias de Acesso

A área objeto da presente Dissertação pertence a denominada Quadrícula de Araras (SF.23-Y-A-II) - Estado de São Paulo, limitada pelas coordenadas 22°00' / 22°30' de latitude sul e 47°00' / 47°30' de longitude oeste, referentes no Sistema UTM (m), datum horizontal Córrego Alegre a:

$X_1 = 241.877,896 / Y_1 = 7.565.031,156; X_2 = 293.519,404 / Y_2 = 7.565.791,250;$

$X_3 = 294.251,546 / Y_3 = 7.510421,402; X_4 = 242.793,510 / Y_4 = 7.509.641,678$

A Figura 1 mostra esquematicamente esta área pertencente a sub-área 6 do Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro. Para atingir a área trafega-se de São Paulo pela rodovia estadual Anhanguera, passando-se por Campinas e Limeira, conforme o mapa de localização e vias de acesso da Figura 2.

1.2 Organização do Trabalho

A integração geofísico-geológica e agronômica tornou-se imprescindível para explicitar as relações espaciais entre os dados aerogamaespectrométricos digitais (K, U e Th) e a atividade agrícola desenvolvida nos solos sobre os quais estão inseridas as anomalias geofísicas. Assim, como a presente Dissertação representou o primeiro contato da autora com espectrometria gama aérea, fez-se necessário um estudo sucinto dos fundamentos do método aerogamaespectrométrico (Capítulo 2). Como também, dentro da geofísica aplicada, fez-se o uso da susceptibilidade magnética, a elaboração de um capítulo pertinente a esta variável foi necessária (Capítulo 5).

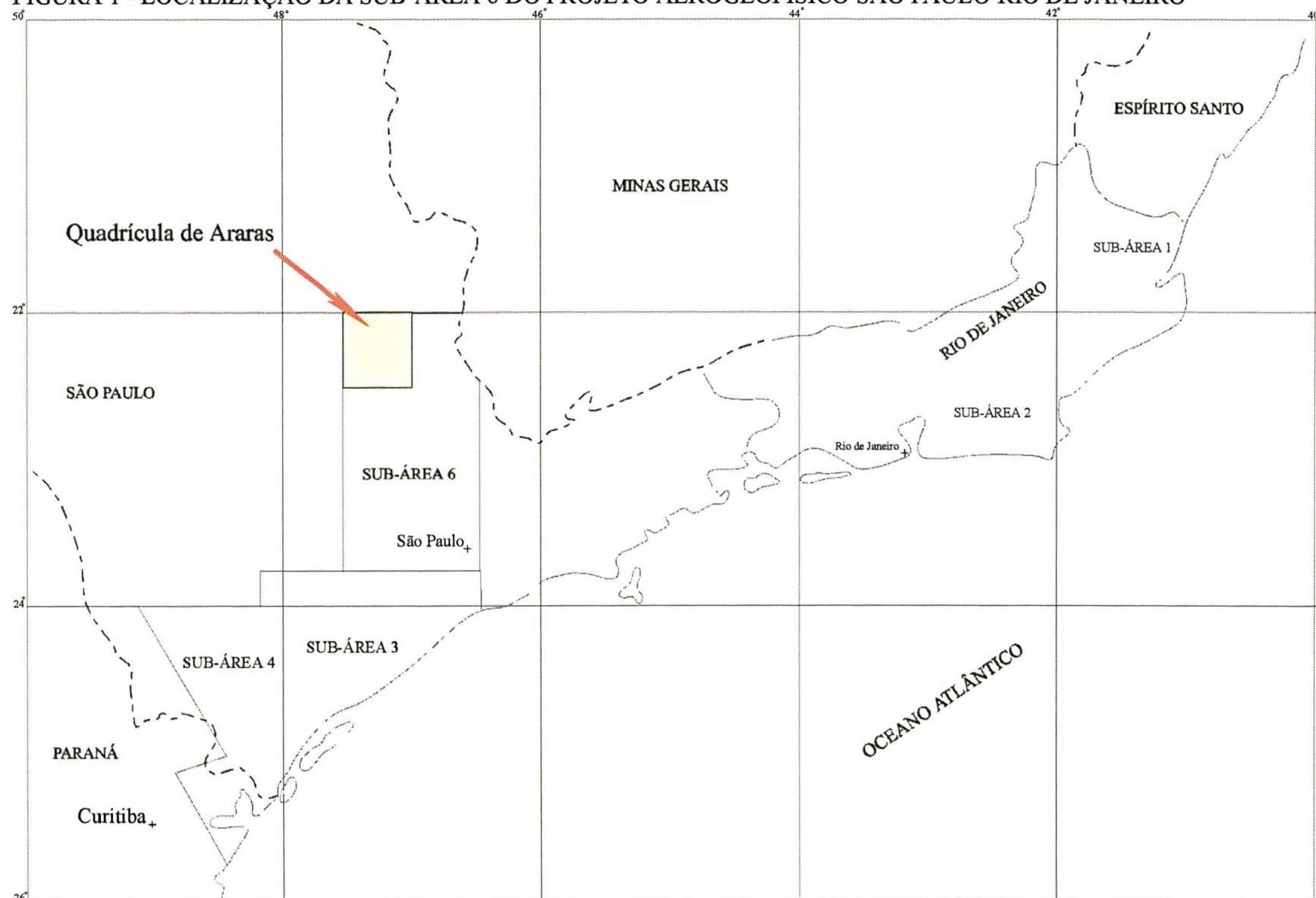
Considerando a necessidade de interpretar a base de dados radiométricos, considerou-se conveniente também rever o comportamento geoquímico dos radioelementos (K, U, Th e Ra) na natureza, assim como sua distribuição nas rochas e nos solos (Capítulo 3).

Partindo da hipótese da eventual redistribuição de radionuclídeos nos solos, oriundos dos fertilizantes fosfatados, julgou-se oportuno rever as relações entre radioatividade e fertilizantes (Capítulo 4).

O Capítulo 7 descreve os principais materiais e métodos utilizados na pesquisa, com ênfase no geoprocessamento, considerado como procedimento moderno capaz de integrar digitalmente um conjunto de dados multifonte da Quadricula de Araras, como: geológicos, pedológicos, de formações superficiais, de uso agrícola dos solos (Capítulo 6); além de topográficos, de drenagem, de sensoriamento remoto e aerogamaespectrométricos (Capítulo 8).

Finalmente, o Capítulo 9 sintetiza as principais conclusões alcançadas, assim como as limitações da pesquisa e recomendações para a sua continuidade.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA SUB-ÁREA 6 DO PROJETO AEROGEOFÍSICO SÃO PAULO-RIO DE JANEIRO



Modificado de Anjos & Mourão (1988)

2 FUNDAMENTOS DO MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO

2.1 Introdução

Henri Becquerel (1852-1908), estudando a radiação emitida por certos sais fluorescentes, depois de serem ativados por luz solar, acidentalmente descobriu o fenômeno da radioatividade. Por acaso deixou algumas amostras de sulfato de urânio e de potássio em uma sala escura, envolvidas em um papel espesso e próximas a placas fotográficas. Quando as placas foram reveladas elas pareciam ter sido expostas à luz, mesmo que estivessem totalmente protegidas dela. Ele repetiu este experimento e constatou que as radiações provinham dos sais de urânio, excitados ou não pela luz. Verificou que os sais de urânio, protegidos durante meses de todas as radiações excitantes conhecidas, emitiam ainda radiações penetrantes sem atenuações significativas. Reconheceu o paralelismo entre sua descoberta e a dos raios X (efetuada meses antes por Röntgen), e constatou que as novas radiações podiam descarregar corpos eletrizados da mesma maneira que os raios X. Compreendeu, assim, que aquelas radiações não eram devidas à fluorescência, mas originárias do próprio urânio. A emissão da radiação foi observada em outras amostras, ao lado do sal de urânio. Este fenômeno é a radioatividade, e os elementos que a exibem são os radionuclídeos.

Hoje, são conhecidos centenas de isótopos radioativos provenientes de diferentes elementos. Isótopos radioativos são muito difíceis de serem isolados do mineral e, freqüentemente, somente pequenas frações de material radioativo são extraídas de muitas toneladas de rochas lavradas.

Segundo IAG (1998), nuclídeos radioativos podem ser divididos em três grupos principais de acordo com a sua origem. O primeiro grupo de núcleos, são representados por: $^{40}\text{K}_{19}$, $^{238}\text{U}_{92}$, $^{235}\text{U}_{92}$ e $^{232}\text{Th}_{90}$, $^{87}\text{Rb}_{37}$, $^{124}\text{Sn}_{50}$, $^{138}\text{La}_{57}$, $^{147}\text{Sm}_{62}$ e outros. A sua síntese está relacionada a origem do sistema solar. Têm meias-vida da mesma ordem de grandeza que a idade da Terra ($4,5 \times 10^9$ anos). O segundo grupo, compreende os isótopos radioativos que são produtos-filho do decaimento natural e de fissão do primeiro grupo. Kogan *et al.* (1969 *apud* Minty 1997) citam que estes têm meias-vida menores, que variam de um segundo a 10^4 - 10^5 anos. No terceiro grupo, IAG (1998) cita que os nuclídeos radioativos têm origem nas interações de partículas nucleares (prótons provenientes do Sol, etc.) com átomos presentes na alta atmosfera ($^{14}\text{N}_7$, etc.), como o $^{14}\text{C}_6$ formado a partir do $^{14}\text{N}_7$. Também cita que os nuclídeos

radioativos de maior contribuição atual à radioatividade ambiental são os do $^{40}\text{K}_{19}$ e das séries do $^{238}\text{U}_{92}$ e do $^{232}\text{Th}_{90}$, e em segundo plano a série do $^{235}\text{U}_{92}$.

Potássio, urânio e tório são os únicos elementos de ocorrência natural com radioisótopos que produzem raios gama com energia e intensidade suficientes para serem medidos em levantamentos aerogamaespectrométricos (Minty, 1997). A média crustal destes elementos é: 2% - K; 2,7 ppm - U; 8,5 ppm - Th.

A aerogamaespectrometria mede a abundância relativa ou a concentração de K, U e Th em rochas e materiais intemperizados, através da detecção da radiação gama emitida pelo decaimento radioativo natural destes elementos (Wilford *et al*, 1997). Segundo Minty (1997), é uma técnica aerogeofísica que requer considerações de muitas variáveis, como por exemplo: contrastes das propriedades físicas e geométricas das fontes radioativas; tamanho e resolução dos detetores; efeitos do meio-ambiente como umidade do solo, vegetação e regime de chuvas; movimento das fontes aéreas de radiação na atmosfera baixa, dentre outras. A interpretação de dados gamaespectrométricos requer uma compreensão de princípios físicos básicos e um controle eficiente na aquisição dos dados, nos sistemas de calibração, no processamento e nos procedimentos de apresentação dos resultados. Também precisam considerar as condições de desequilíbrio radioativo que ocorrem nas séries de decaimento do urânio, bem como os comportamentos geoquímicos do potássio, do urânio e do tório no meio ambiente.

O objetivo deste capítulo é mostrar os fundamentos da aerogamaespectrometria, incluindo assim princípios da radioatividade básica, bem como os detetores utilizados e as correções necessárias exigidas neste tipo de levantamento, uma vez que a principal base de dados da presente Dissertação é oriunda de levantamentos aerogamaespectrométricos.

2.2 Radioatividade Básica

2.2.1 Diferentes Tipos de Radiação

As radiações de substâncias radioativas naturais são classificadas em três diferentes tipos, dependendo de suas energias penetrativas. Segundo Arya (1966), o primeiro tipo, as partículas alfa (α), é caracterizado por uma energia muito pouco penetrativa, sendo barrada por uma fina lâmina de papel, causando ionização no ar. O segundo tipo, as partículas beta (β), apresenta energia penetrativa maior e ioniza o ar por alguns centímetros, podendo facilmente atravessar uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura. O terceiro tipo, os raios

gama (γ), pode ionizar o ar até 300 metros (Wulff 1990 *apud* Grasty 1979), e por isso é registrado em levantamentos aerogamaespectrométricos, além de atravessar lâminas de muitos centímetros de espessura, de diferentes materiais.

O efeito do campo magnético na radiação foi estudado por F. Giesel, S. Meyer e E. von Schweidler. Tais pesquisadores mostraram, independentemente, que certas frações da radiação poderiam ser desviadas pela aplicação de um forte campo magnético. Rutherford demonstrou que partículas α mostravam um pequeno desvio, quando influenciadas por um forte campo magnético e comportavam-se como cargas positivas. As partículas β , mostraram desvios maiores e comportavam-se como partículas negativas. Já os raios γ , conforme demonstrado por R. Strutt 1903 (Arya 1966), não desviavam-se sob a ação de campos magnéticos semelhantes.

2.2.1.1 Raios Gama

Os raios gama produzem fluorescência e causam ionização em ambiente gasoso, mas em menor grau do que os raios α e β . A energia penetrativa dos raios γ é 100 (cem) vezes maior do que a dos raios β . Podem penetrar em mais de 30 cm de rocha e várias dezenas de metros no ar (Minty, 1997). Os raios γ não são obstruídos por alguns centímetros de alumínio, mas poucos centímetros de chumbo podem deter uma boa fração destes raios. Como não apresentam carga, não são desviados por campos elétricos ou magnéticos, e exibem todas as características de uma onda eletromagnética. Na realidade, raios γ são raios X de curto comprimento de onda. Possuem a velocidade da luz e exibem comprimentos de onda de $1,7 \times 10^{-10} / 4$, 1×10^{-8} cm, sendo caracterizados por uma faixa de frequência entre 3×10^{19} e 3×10^{21} Hz. As energias de interesse geológico variam entre 0,2 e 3 MeV, as quais correspondem a comprimentos de onda de aproximadamente 3×10^{-12} m e a uma frequência de cerca de 3×10^{19} Hz (Minty, 1997).

2.2.1.1.1 Interação da Radiação Gama com a Matéria

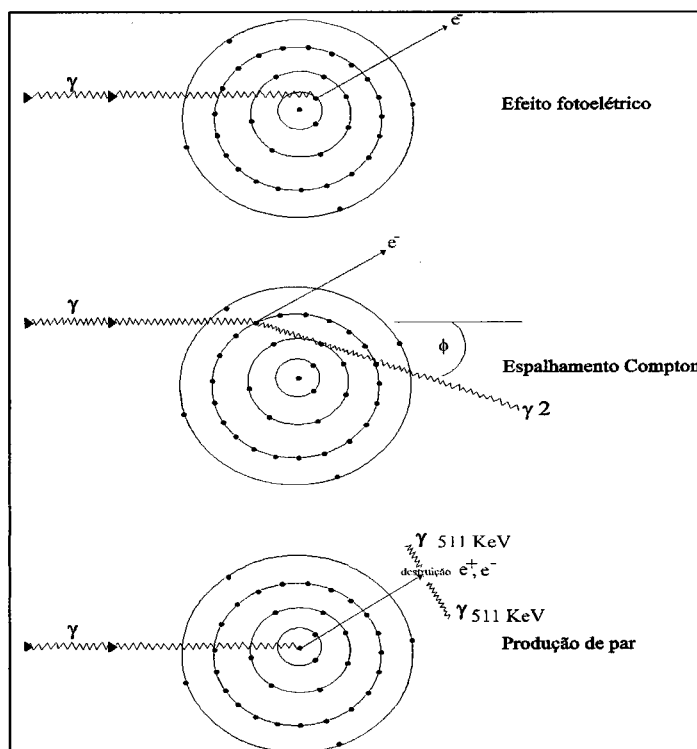
Existem três processos principais pelos quais a radiação gama interage com a matéria: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de par (Figura 3).

No efeito fotoelétrico o raio gama é completamente absorvido por um elétron periférico, o qual é expelido de um átomo. É um processo de absorção que se processa, predominantemente, em condições de baixos níveis de energia.

O espalhamento Compton, é um processo pelo qual um fóton incidente perde parte de sua energia para um elétron e é espalhado segundo um ângulo relacionado a sua direção original. A perda de energia do raio gama é transferida, por energia cinética, para um elétron. É um processo onde predominam níveis moderados de energia.

Na produção de par o fóton incidente é completamente absorvido, resultando na criação de um par de elétron-pósitron, no campo eletrostático de um núcleo, com uma energia total equivalente àquela do fóton original. Pode ocorrer em níveis energéticos maiores do que 1,02 MeV e predomina em energias muito altas, particularmente em materiais de elevado número atômico (maior do que 30).

FIGURA 3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA

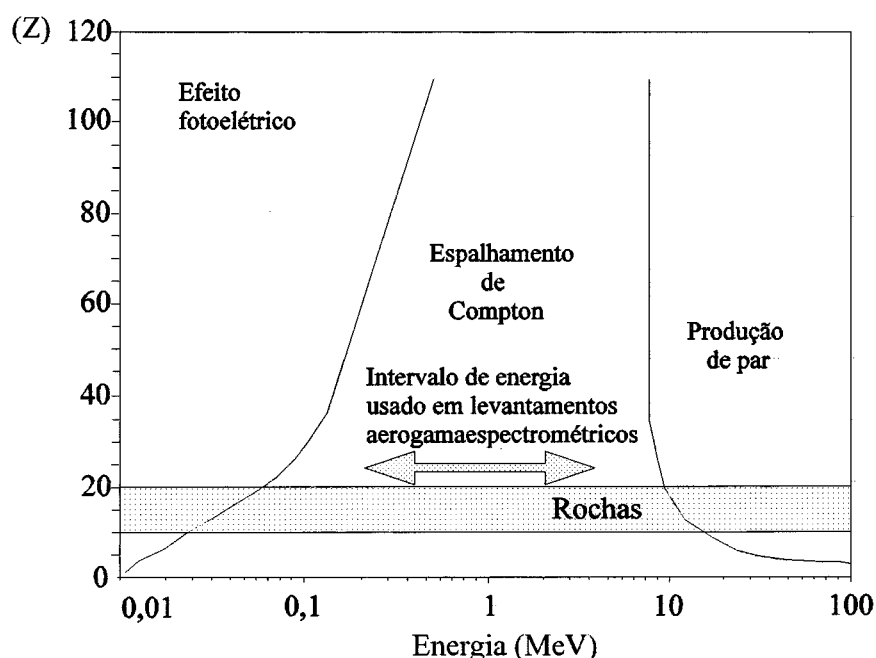


Modificado de Grasty (1997)

A relação entre estes processos (Minty, 1997) é mostrada na Figura 4, na qual tem-se a energia dos raios gama do fóton incidente (eixo x) e o número atômico do meio absorvente

(eixo y). Verifica-se que o efeito Compton é o processo predominante no intervalo de energia de levantamentos aerogamaespectrométricos. Como a maioria dos materiais objeto de medidas aerogamaespectrométricas possuem um número atômico (Z) baixo (entre 10 e 20), e também a maioria da radiação gama é de baixa a média energia (menor do que 2,62 MeV), o espalhamento Compton é o processo predominante entre a fonte de radioatividade e o detector.

FIGURA 4 - INTERAÇÃO DOS RAIOS GAMA COM A MATÉRIA



Modificado de Minty (1997)

2.2.2 Decaimento Radioativo

Quando o núcleo de um átomo emite uma partícula alfa, uma partícula beta, um raio gama, ou então quando captura um elétron da camada extra-nuclear, o processo é chamado de decaimento radioativo (Arya, 1966).

A lei do decaimento radioativo é um fenômeno estatístico resultante de um grande número de eventos, sujeitos a lei da probabilidade (Kaplan, 1978).

Para apresentar a descrição estatística da radioatividade, Wehr & Ricahrd Jr (1965), sugerem que partamos do instante $t=0$ com N_0 átomos radioativos e, representando λ como a probabilidade de que um destes átomos se desintegre na unidade de tempo. Se há N átomos em qualquer instante posterior t , o número provável que se desintegrará na unidade de tempo será

λN . Como cada desintegração reduz o número N , pode-se então representar o número provável de desintegrações por unidade de tempo (ou atividade) por $-dN/dt$. Assim, tem-se:

$$-dN/dt = \lambda N \quad \text{ou} \quad dN = -\lambda dt N$$

Esta equação, segundo Arya (1966) mostra que o número de decaimentos no tempo, dt , é proporcional ao número inicial de átomos (N) e ao intervalo de tempo dt . O sinal negativo significa que N decresce quando t cresce.

Assumindo-se que no instante $t = 0$ o número de átomos radioativos presentes é N_0 , e integrando-se a equação anterior, tem-se o número de átomos radioativos presentes em um tempo t , o qual pode ser representado pela seguinte equação:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

onde,

N = número de átomos presentes no tempo t ;

N_0 = número de átomos presentes no tempo $t = 0$;

λ = constante de desintegração ou constante de decaimento.

A atividade de uma amostra radioativa, a qual é definida como o número de desintegrações por unidade de tempo, é representada por:

$$\text{Atividade} = |dN/dt| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

Assim, a atividade de uma amostra dependerá do número N de átomos radioativos e da constante de decaimento λ .

Uma grandeza de importância no estudo da radioatividade é a meia-vida. Também representada por $t_{1/2}$ ou T , esta variável é definida como o intervalo de tempo necessário para que a atividade ou número de átomos iniciais se reduza a metade da quantidade inicial. Substituindo-se $N = N_0/2$ e $t = t_{1/2}$ na equação $N = N_0 e^{-\lambda t}$, obtém-se:

$$t_{1/2} = 1/\lambda \times \ln 2 = 0,693/\lambda$$

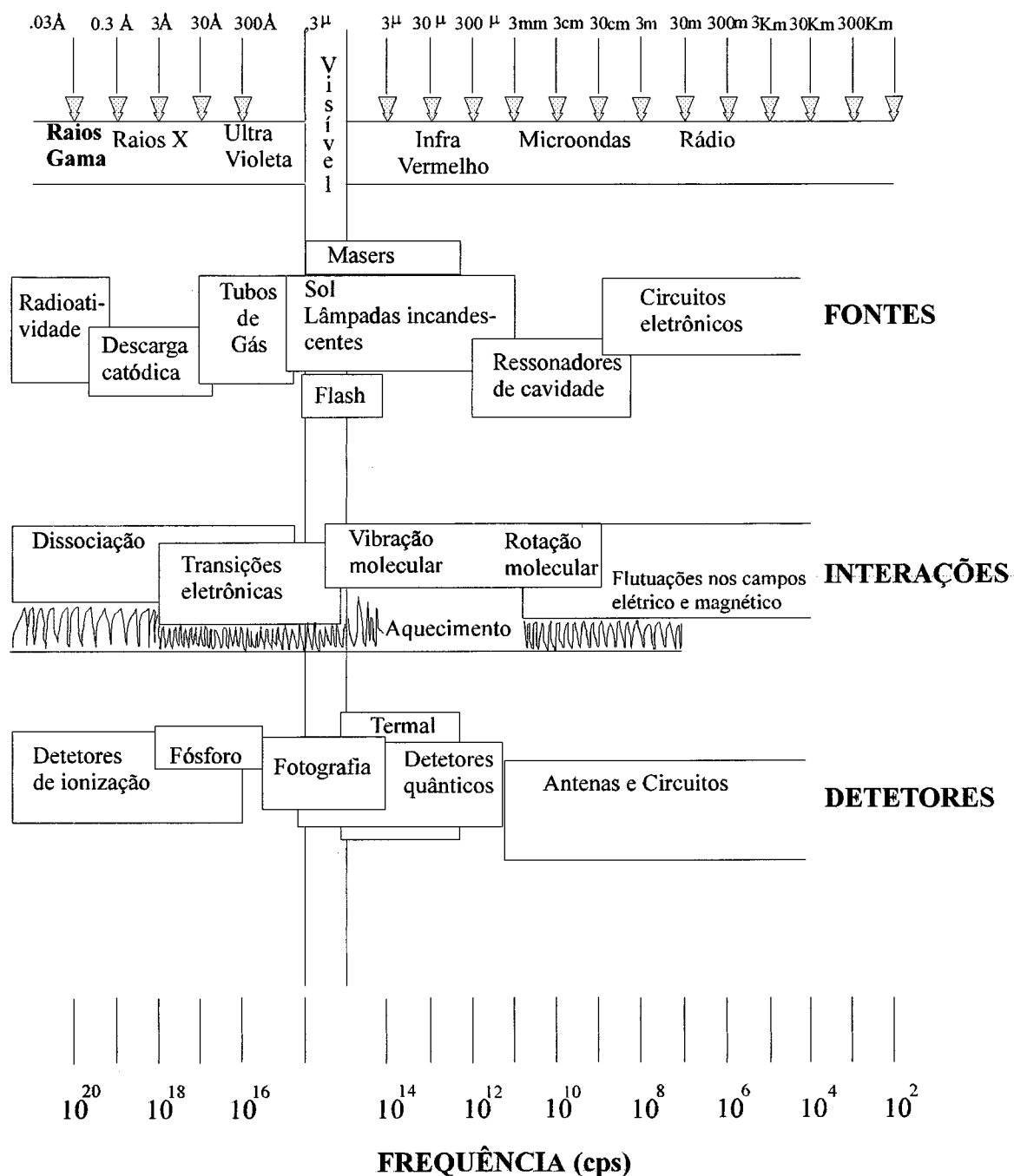
São conhecidos três tipos de decaimento radioativo: decaimento alfa (α), decaimento beta (β) e decaimento gama (γ).

O decaimento pela emissão de uma partícula, como uma partícula alfa ou beta, usualmente leva o núcleo a um estado excitado. Retornando ao seu estado normal, o núcleo

emite mais uma partícula, o *quantum* ou raio γ (Parasnis, 1977). Como anteriormente citado, este raio é uma energia puramente eletromagnética.

A Figura 5 mostra o espectro eletromagnético com as radiações conhecidas.

FIGURA 5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E SUAS PRINCIPAIS FONTES DE RADIAÇÃO



Modificado de Colwell (1963 *apud* Novo 1989)

Observa-se que a radiação gama está representada na região de curtíssimos comprimentos de onda, quando comparadas às regiões onde os equipamentos de sensoriamento remoto operam, como as regiões do visível, infravermelho e microondas. Sua frequência (cps) elevada, revela que a energia envolvida também é superior às das outras regiões do espectro. Pois, de acordo com Planck, o *quantum* de energia é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ), satisfazendo a seguinte expressão:

$$Q = h \times f$$

onde:

Q = energia (J);

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js);

f = frequência.

Como $\lambda = c / f$ (c = velocidade da luz = 3×10^8 m/s), substituindo-se f na equação anterior, tem-se que $\lambda = h \times c / Q$.

É nesta região que atuam os levantamentos aerogamaespectrométricos, que de acordo com Wilford *et al.* (1997) é uma técnica passiva de sensoriamento remoto.

2.2.3 Séries Radioativas

A maioria dos elementos pertencentes às séries radioativas naturais apresentam número atômico entre $Z = 81$ e $Z = 92$ (Arya, 1966).

Com anteriormente mencionado, os elementos de ocorrência natural nos quais os radioisótopos produzem raios gama de suficiente energia e intensidade para serem medidos em levantamentos aerogamaespectrométricos são o urânio, o tório e o potássio.

O urânio ocorre naturalmente como radioisótopos do ${}_{92}^{238}\text{U}$, e do ${}_{92}^{235}\text{U}$, cujas séries radioativas terminam em isótopos estáveis de ${}^{206}\text{Pb}$ e ${}^{207}\text{Pb}$, respectivamente. O ${}_{92}^{238}\text{U}$ apresenta uma meia vida de $4,47 \times 10^9$ anos. A meia-vida do ${}_{92}^{235}\text{U}$ é de $7,13 \times 10^8$ anos. A razão ${}_{92}^{235}\text{U} / {}_{92}^{238}\text{U}$ muda muito pouco com o tempo, entretanto mudou consideravelmente desde a formação da Terra. O ${}^{235}\text{U}$ representa apenas 0,72% da ocorrência natural de urânio e as energias dos raios gama da sua série são baixas para serem diagnosticadas em levantamentos

aerogamaespectrométricos (Minty, 1997). As séries do decaimento do ^{238}U e do ^{235}U são mostradas nas tabelas 1 e 2.

O tório ocorre naturalmente como radioisótopo do ^{232}Th , cuja série radioativa termina no isótopo estável ^{208}Pb (Tabela 3).

Segundo Arya (1966), estas três séries radioativas apresentam propriedades em comum:

- 1) todas apresentam uma longa meia-vida;
- 2) os produtos finais estáveis das três séries, do tório, do urânio e do actínio são isótopos de chumbo, ou seja, $^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$ e $^{208}_{82}\text{Pb}$, respectivamente;
- 3) cada uma das séries apresenta um gás inerte com $Z = 86$. Estes gases são: torônio ($^{220}_{86}\text{Rn}$), radônio ($^{222}_{86}\text{Rn}$) e actínio ($^{219}_{86}\text{Rn}$), respectivamente das séries do tório, urânio e do actínio.

Minty (1997) menciona que o ^{40}K é apenas um isótopo radioativo de K, representando apenas 0,012% do K total, e que há uma probabilidade de 89 % do núcleo ^{40}K decair por emissão de elétron para ^{40}Ca , e uma probabilidade de 11% de decair por captura de elétron para ^{40}Ar . Estes são seguidos por uma emissão de fótons de raios gama com energias de 1,46 MeV. Visto que o ^{40}K ocorre como uma proporção fixa do K natural, o fluxo de raios gama do ^{40}K pode ser usado para estimar a quantidade total de K. O ^{40}K é uma fonte de radiação muito mais discreta do que as séries do U e do Th, mas devido a sua abundância na crosta (2%), sua contribuição ao fluxo de radiação natural é considerada como equivalente aos das séries mencionadas. Sua meia-vida, segundo Arya (1966) é de $1,2 \times 10^9$ anos.

TABELA 1 - SÉRIE DO DECAIMENTO RADIOATIVO DO ^{238}U

Nuclídeo	Meia-vida	Energia de radiação (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
^{238}U	$4,468 \times 10^9$ anos	4,15 (23%) 4,19 (77%)	-	-
^{234}Th	24,1 dias	-	~0,103 (19%) 0,191 (81%)	0,063 (3,5%) 0,093 (4%)
^{234}Pa	1,18 meses	-	2,29 (98%)	0,765 (0,30%) 1,001 (0,60%)
^{234}Pa (99,86% → 0,14%)	6,7 horas	-	0,53 (66%) 0,191 (81%)	0,10 (50%) 0,7 (24%) 0,9 (70%)
^{234}U	$2,48 \times 10^5$ anos	4,72 (28%) 4,77 (72%)	-	0,053 (0,2%)
^{230}Th	$7,52 \times 10^4$ anos	4,62 (24%) 4,68 (94,5%)	-	0,068 (0,6%) 0,142 (0,07%)
^{226}Ra	1602 anos	4,6 (5,5%) 4,78 (94,5%)	-	0,186 (4%)
^{222}Rn	3,825 dias	5,49 (~100%)	-	0,510 (0,07%)
^{218}Po	3,05 meses	6,11 (100%)	0,33 (100%)	-
^{218}Po (99,98% → 0,02%)	26,8 meses	-	1,03 (6%)	0,295 (19%) 0,352 (36%)
^{214}Pb (218At)	2 segundos	6,65 (6%) 6,7 (94%)	0,67 (94%)	-
^{214}Bi	19,7 meses	5,61 (100%)	3,26 (100%)	0,609 (47%) 1,120 (17%) 1,764 (17%)
^{214}Po (99,96% → 0,04%)	164 μsegundos	7,83 (100%)	-	0,799 (0,014%) 0,296 (80%) 0,795 (100%) 1,31 (21%)
^{210}Pb	~22 anos	3,7 ($1,8 \times 10^{-8}$ %)	0,017 (85%) 0,064 (15%)	0,047 (4%)
^{210}Bi	5,02 dias	4,93 (60%) 4,89 (34%) 4,59 (5%)	1,155 (100%)	-
^{210}Po (~100% → ~0,0001%)	138,3 dias	5,3 (100%)	-	0,803 (0,0011%)
^{206}Pb	4,19 meses	-	1,520 (100%)	-
^{208}Pb	estável	-	-	-

* Intensidade refere-se a percentagem de desintegração do próprio nuclídeo, não em relação ao pai da série

Modificado de Minty (1997)

TABELA 2 - SÉRIE DO DECAIMENTO RADIOATIVO DO ^{235}U

Nuclídeo	Meia-vida	Energia de radiação (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
^{235}U ↓	$7,13 \times 10^8$ anos	4,36 (18%) 4,39 (57%) 4,1-4,6 (8%)	-	0,143 (11%) 0,185 (54%) 0,204 (5%)
^{234}Th ↓	25,64 dias	-	0,30 (100%)	0,026 (2%) 0,084 (10%)
^{234}Pa ↓	$3,43 \times 10^4$ anos	5,01 (<20%) 4,99 (25,4%) 4,94 (22,8%)	-	0,027 (6%) 0,29% (6%)
^{227}Ac ↓	22 anos	4,95 (48,7%) 4,94 (36,1%) 4,87 (6,9%)	0,046 (100%)	0,07 (0,08%)
^{227}Th (98,8%) ↓ ^{223}Fr (1,2%)	18,17 dias	5,76 (21%) 5,98 (24%) 6,04 (23%)	-	0,050 (8%) 0,237 (15%) 0,31 (8%)
^{226}Ra ↓	21 meses	5,34 (0,005%)	1,15 (100%)	0,05 (8%) 0,237 (15%) 0,31 (8%)
^{226}Ra ↓	11,68 dias	5,51 (26%) 5,71 (53,7%) 5,75 (9,1%)	-	0,149 (10%) 0,270 (10%) 0,33 (6%)
^{219}Rn ↓	3,92 segundos	6,42 (8%) 6,55 (11%) 6,82 (81%)	-	0,272 (9%) 0,401 (5%)
^{215}Po ↓	1,83 msegundos	7,38 (100%)	-	-
^{214}Pb ↓	36,1 meses	-	0,95 (1,4%) 6,55 (5,5%) 1,36 (92,4%)	0,405 (3,4%) 0,427 (1,8%) 0,832 (3,4%)
^{214}Bi ↓	2,16 meses	6,28 (17%) 6,62 (83%)	0,60 (0,38%)	0,351 (14%)
^{214}Po (99,98%) ↓ ^{207}Tl (0,02%)	0,52 segundos	7,43 (99%)	-	0,570 (0,5%) 0,9 (0,5%)
^{207}Tl ↓	4,79 meses	-	1,44 (100%)	0,897 (0,16%)
^{207}Pb	Estável	-	-	-

* Intensidade refere-se a percentagem de desintegração do próprio nuclídeo, não em relação ao pai da série

Modificado de Minty (1997)

TABELA 3 - SÉRIE DO DECAIMENTO RADIOATIVO DO ^{232}Th

Nuclídeo	Meia-vida	Energia de radiação (MeV) e intensidade*		
		α	β	γ
^{232}Th ↓	$1,39 \times 10^{10}$ anos	3,95 (24%) 4,01 (76%)	-	-
^{228}Ra ↓	5,75 anos	-	0,055 (100%)	-
^{228}Ac ↓	6,13 horas	-	2,11 (100%)	0,34 (15%) 0,908 (25%) 0,96 (20%)
^{228}Th ↓	19,13 anos	5,34 (28%) 5,42 (71%)	-	0,084 (1,6%) 0,214 (0,3%)
^{224}Ra ↓	3,64 dias	5,45 (5,5%) 5,68 (94,5%)	-	0,241 (3,7%)
^{220}Rn ↓	55,6 segundos	6,3 (~100%)	-	0,55 (0,07%)
^{216}Po ↓	0,145 segundos	6,78 (100%)	-	-
^{212}Pb ↓	10,64 horas	-	0,580	0,239 (47%) 0,300 (3,2%)
^{212}Bi ↓	60,5 meses	6,05 (70%) 6,09 (30%)	2,25 (100%)	0,040 (2%) 0,727 (7%) 1,620 (1,8%)
<div> <div>64,0% ↓</div> <div>36,0% ↓</div> <div> ^{212}Po </div> <div> ^{208}Tl </div> <div> <div>304 nsegundos</div> <div>3,1 meses</div> </div> <div> <div>↓</div> <div>↓</div> </div> <div> ^{208}Pb </div> <div>estável</div> </div>		8,78 (100%) -	- 1,8 (100%)	- 0,511 (23%) 0,583 (86%) 0,860 (12%) 2,614 (100%)
		-	-	-

* Intensidade refere-se a percentagem de desintegração do próprio nuclídeo, não em relação ao pai da série

Modificado de Minty (1997)

2.2.4 Equilíbrio Radioativo

Segundo Killeen (1979), o conhecimento do equilíbrio radioativo ou desequilíbrio é de grande importância para a interpretação de levantamentos gamaespectrométricos. A espectrometria dos raios gama pode ser usada para determinar as concentrações na rocha de urânio, de tório e de potássio devido às específicas energias dos raios estarem associadas com cada radioelemento. Assim, observando-se os picos de energia do espectro de raios gama emitidos pela fonte, o teor de radioelementos desta podem ser inferidos. O método envolve a contagem dos fótons de raios gama com específicas energias, mais convenientemente aquelas emitidas pelos seus filhos: ^{214}Bi na série de decaimento do ^{238}U e o ^{208}Tl na série do decaimento do ^{232}Th . A taxa de contagem dos raios gama pode então ser relacionada com a quantidade do pai no decaimento radioativo, ao assumir-se que há uma relação direta entre a quantidade do filho e do pai, devida ao equilíbrio radioativo.

Uma série de radioativa, como a do ^{238}U é dita estar em equilíbrio secular quando o número de átomos de cada filho que está sendo produzido na série é equivalente ao número de átomos dos filhos que estão sendo perdidos pelo decaimento radioativo.

A perda pelo decaimento é proporcional à quantidade do radioelemento presente, por exemplo:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$$

onde,

N_1 = a quantidade do elemento 1;

λ_1 = constante de decaimento do elemento 1.

Na série do decaimento radioativo, N_1 está decaindo em N_2 , enquanto que no mesmo tempo este, com sua constante radioativa λ_2 , está decaindo em N_3 e assim sucessivamente. Se o pai tem relativamente uma longa meia-vida, depois de um longo período de tempo, a quantidade de algum dado filho virá a ser constante. A taxa de produção de seu pai é equivalente a sua taxa de decaimento. A série radioativa, então, está em estado de equilíbrio secular, satisfazendo a seguinte expressão:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \lambda_n N_n$$

Quando esta condição é obtida, é possível determinar a quantidade do pai da série do decaimento radioativo pela medida (detecção) de algum elemento filho.

Se um ou mais dos produtos-filhos está sendo removido por algum outro processo qualquer do que o decaimento radioativo, a equação anterior não será válida.

Minty (1997) menciona que o desequilíbrio radioativo é uma séria fonte de erros em levantamentos gamaespectrométricos. O desequilíbrio secular ocorre quando um ou mais produtos são completamente ou parcialmente removidos, ou ainda adicionados ao sistema e podem levar dias, semanas ou milhões de anos para restaurar o equilíbrio, dependendo da meia-vida do radioisótopo envolvido. O citado autor ainda menciona que o tório raramente ocorre fora do equilíbrio na natureza e que o potássio (que não é série), por exibir um único fotopico, não causa nenhum problema de desequilíbrio. Já na série de decaimento do urânio, o desequilíbrio é comum no ambiente natural, em função do fracionamento, que pode ser devido a mecanismos químicos e físicos. Exemplos de mecanismos químicos pode-se citar a coprecipitação, a adsorção e o *uptake* (captura) biológico. Assim, Ra sendo removido da solução por hidróxidos de ferro - coprecipitação; Ra que é preferencialmente aderido à superfície das argilas - adsorção; Ra é mais facilmente absorvido pelos tecidos das plantas quando comparado ao U - *uptake* biológico. Tanto U como Ra são solúveis e, por conseguinte, transportáveis. Em ambiente de oxidação, U é preferencialmente lixiviado em relação ao Ra e este, em ambiente redutor, é preferencialmente lixiviado em relação ao U. Se ^{222}Rn escapa, os nuclídeos de curta meia-vida, ^{214}Bi e ^{214}Pb , que são os maiores emissores de raios gama, os quais ocorrem abaixo do ^{222}Rn na série do decaimento do U, decairão em atividades insignificantes em poucas horas. Neste caso, o tempo para se restabelecer o equilíbrio é de 38 dias, pois o tempo necessário para restaurar 99,9% do equilíbrio de um membro que sofreu distúrbio em uma série radioativa é aproximadamente 10 (dez) vezes a meia-vida do membro que sofreu tal perturbação. Onde existe uma preferência para lixiviação de ^{238}U e ^{234}U em relação ao Ra, pode-se levar milhões de anos para se restabelecer o equilíbrio. Neste caso, o ^{214}Bi e o ^{214}Pb apresentarão concentrações elevadas por um longo tempo, embora ^{238}U e ^{234}U possam ter sido completamente removidos. Isto é devido a longa meia-vida do ^{230}Th , o qual fica entre o ^{234}U e ^{214}Bi - ^{214}Pb na série de decaimento do U (Tabela 1). Isótopos de Rn (Actinon - ^{219}Rn e Thoron - ^{220}Rn) que ocorrem nas séries do ^{235}U e do ^{232}Th , não são fontes de desequilíbrio porque suas meias-vida são muito curtas.

2.2.5 Propriedades do Espectro Aéreo da Radiação Gama

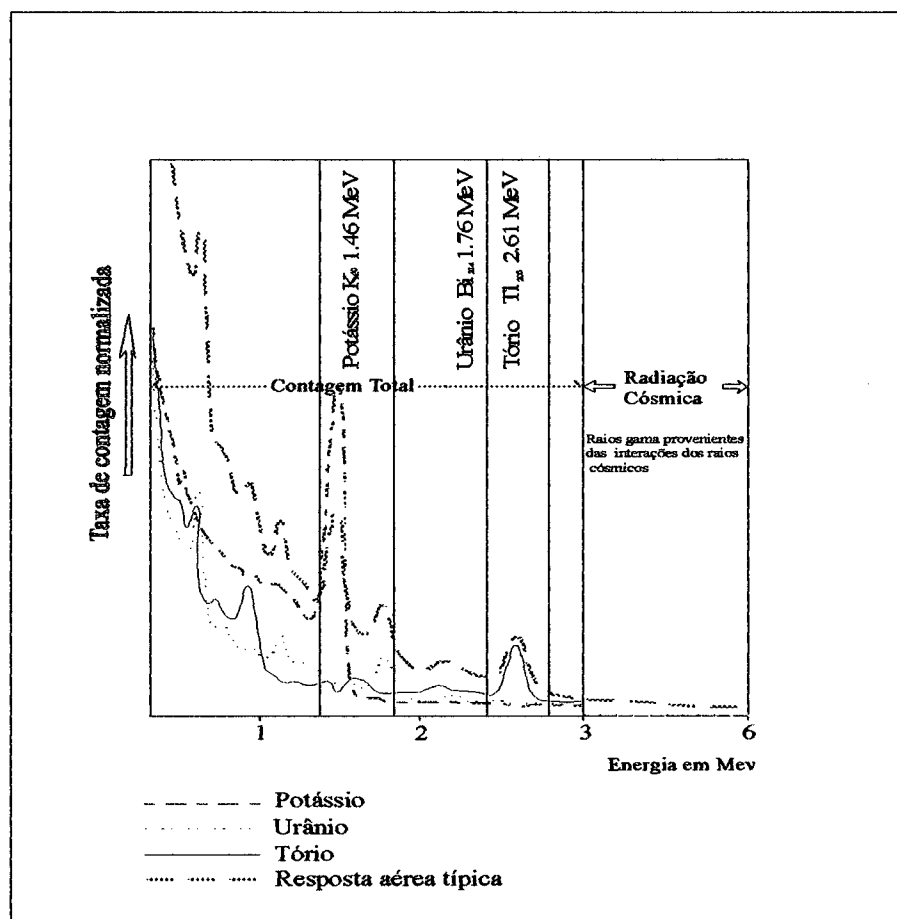
A Tabela 4 e a Figura 6 mostram as janelas-padrão para mapeamento de radioelementos de acordo com a *International Atomic Energy Association* - IAEA (1991 *apud* Minty 1997).

TABELA 4 - JANELAS-PADRÃO UTILIZADAS EM LEVANTAMENTOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

Janela	Nuclídeo	Energia (MeV)
Contagem Total	-	0,4 - 2,81
Potássio	^{40}K (1,460 MeV)	1,370 - 1,570
Urânio	^{214}Bi (1,765 MeV)	1,660 - 1860
Tório	^{208}Tl (2,614 MeV)	2,410 - 2,810

Modificado de Minty (1997)

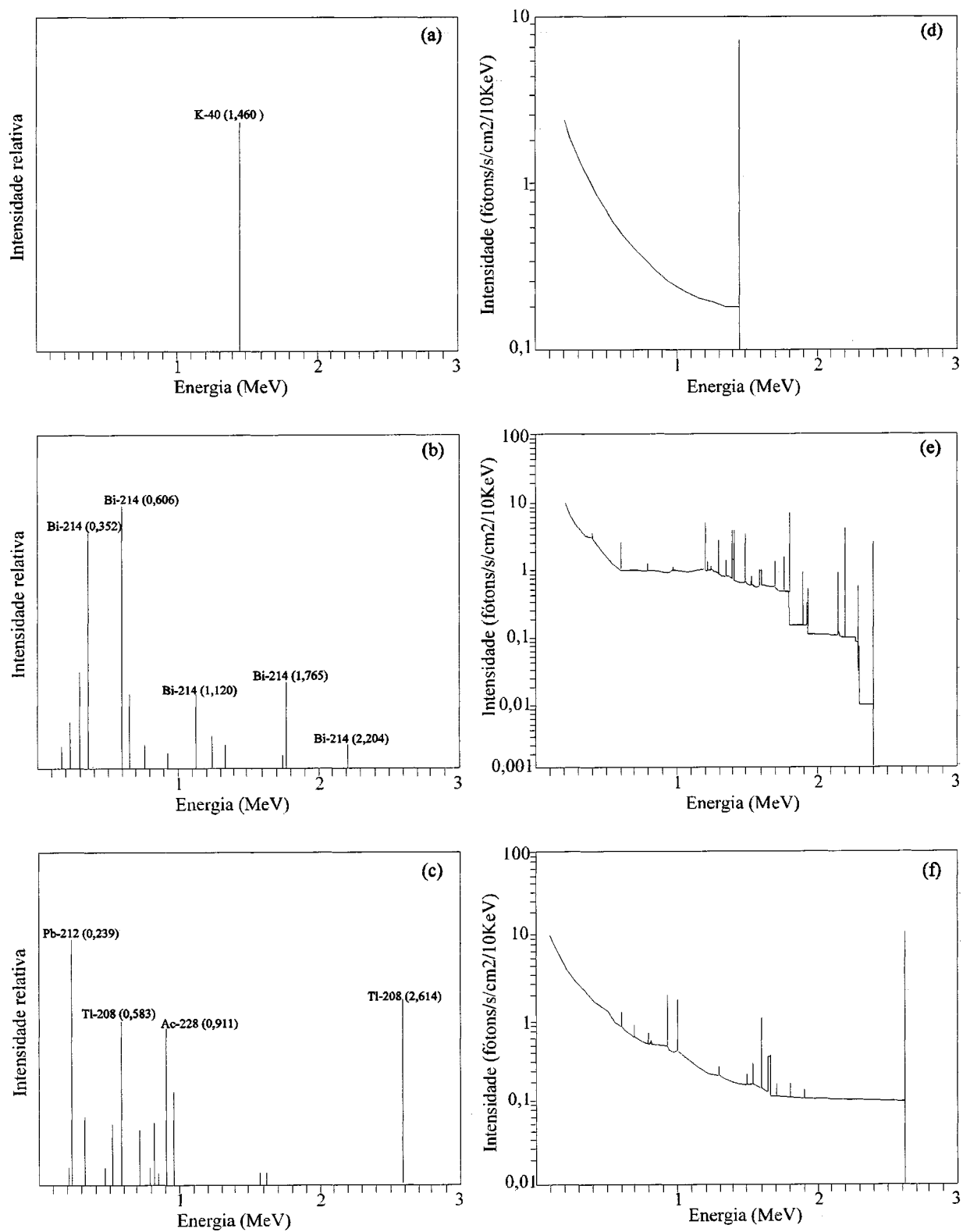
FIGURA 06 - JANELAS PADRÃO UTILIZADAS EM LEVANTAMENTOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS



Modificado de Minty (1997)

De acordo com Minty (1997), o K e as séries de equilíbrio U e Th apresentam linha espectral teórica característica, como mostrado nas figuras 7a, 7b e 7c. Estas linhas espectrais representam a distribuição de energia dos fótons emitidos pela fonte. Porém, a energia destes fótons originais é degradada pelo espalhamento Compton na fonte, na matéria entre a fonte e o detector e no próprio detector. Uma simulação dos fluxos de raios gama devido ao K, ao U e ao Th a 300 m de altura, é mostrada nas figuras 7d, 7e e 7f. Verifica-se que cada radioelemento gera um pico pronunciado, representando a energia diretamente transmitida dos fótons. Ao proceder a superposição ao espectro de espalhamento Compton, verifica-se que a energia é contínua acima do máximo de fótons emitidos pelo isótopo, como observado, por exemplo, na Figura 7d. Esta linha contínua é devida a eventos simples e múltiplos do espalhamento Compton entre a fonte e o detector. A distribuição dos fluxos de raios gama mostradas nas figuras 7e e 7f são, então, a soma do fluxo espectral de cada radioelemento na respectiva série de decaimento. A contribuição relativa de fótons espalhados e não espalhados para o fluxo de raios gama em levantamentos aéreos, depende da geometria da fonte (espessura e extensão lateral) e da quantidade de material atenuante entre a fonte e o detector. A forma do espectro de fluxos de raio gama é função da concentração de radioelementos na fonte, da geometria da fonte e da espessura de algumas sobrecargas não radioativas. Na prática, é impossível registrar-se o espectro de raios gama mostrados nas figuras 7d, 7e e 7f. Isto é devido a forma do espectro medido, em adição aos fatores mencionados anteriormente, bem como em função da resposta do detector.

FIGURA 7 - LINHAS ESPECTRAIS DO K (a), DO U (b), DO Th (c) E SIMULAÇÃO DO FLUXO DE RAIOS GAMA A 300 m DE ALTURA DO K (d), DO U (e) E DO Th (f)



Modificado de Minty (1997)

2.2.6 Unidades

As unidades mais comuns em radioatividade são expressas em termos de desintegrações por unidade de tempo. Existem dois tipos diferentes de unidades. Historicamente, a unidade mais antiga é a curie (Ci), que é definida como a quantidade de atividade de radônio que está em equilíbrio com um grama de rádio. Como a meia-vida do rádio é de 1620 anos, a sua constante de decaimento é:

$$\lambda_{\text{rádio}} = 0,693 / 1,62 \times 10^3 \text{ anos} = 13,8 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

A massa do rádio é de 226 u.m.a.(unidade de massa atômica) e há $6,02 \times 10^{23}$ átomos em um grama de rádio. Assim, um grama de rádio contém:

$$6,02 \times 10^{23} / 2,26 \times 10^2 = 2,66 \times 10^{21} \text{ átomos}$$

Portanto, a taxa de desintegração é:

$$dN/dt = |\lambda N| = 13,8 \times 10^{-12} \times 2,66 \times 10^{21} \cong 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegrações / segundo}$$

Desta forma, um Curie (1 Ci) tem sido definido como equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo e as sub-unidades são: millicurie (mCi) e microcurie (μ Ci), as quais correspondem a $3,7 \times 10^7$ e $3,7 \times 10^4$ desintegrações por segundo, respectivamente (Arya, 1966). Unidades como pico Curie (pCi) ou nano Curie (nCi), também são comuns. São equivalentes, respectivamente, a 10^{-12} e 10^{-9} Ci. Um pico curie por grama de rocha (1 pCi/g), por exemplo, é equivalente a uma parte de rádio por um trilhão de partes de rocha, e 1 pCi por litro de água é equivalente a uma parte de rádio por 1000 trilhões de partes de água (Gross, 1980).

Os resultados radioquímicos geralmente expressam os teores da atividade dos radionuclídeos em Becquerel por quilo de amostra (Bq/kg). O fator de conversão (de Bq para ppm) de U^{238} e Th^{232} , são os seguintes:

$$1 \text{ ppm } U_{\text{nat}} = 24,08 \text{ Bq/kg};$$

$$1 \text{ ppm } U^{238} = 12,3 \text{ Bq/kg};$$

$$1 \text{ ppm } Th^{232} = 4,07 \text{ Bq/kg}.$$

Segundo Wilford *et al.* (1997), como os raios gama não apresentam nenhuma mudança de carga ou massa e são emitidos em diferentes níveis ou picos energéticos de radioisótopos particulares, pode-se estimar a abundância relativa ou a concentração destes elementos no solo e na rocha pela intensidade de emissão dos seus picos. Na aerogamaespectrometria, o ^{40}K é medido diretamente pelo decaimento do ^{40}Ar . As concentrações de U e Th já são mais complexas, uma vez que ^{232}Th e ^{238}U decaem totalmente em séries de núclídeos-filho, até alcançar os isótopos estáveis de Pb. Picos de emissões diferenciadas associados com ^{208}Tl e ^{214}Bi , são usados para calcular a abundância de Th e U, respectivamente (Minty, 1997). Conseqüentemente, U e Th são geralmente expressos em partes equivalentes (eU e eTh), as quais indicam que suas concentrações são inferidas dos elementos-filho nas suas séries de decaimento, enquanto que devido a sua elevada abundância crustal, o K é geralmente expresso em percentagem (%K).

Os dados digitais do Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro (Anjos & Mourão, 1988), que inclui a região de Araras - Leme (SP) da presente Dissertação, foram obtidos nas janelas do K, do U, do Th e da CT (contagem total), referentes às energias de 1,46 MeV (^{40}K); 1,765 MeV (^{214}Bi) e 2,615 MeV (^{208}Tl), respectivamente. No Brasil, os dados (cps) dos levantamentos aerogamaespectrométricos não são transformados em partes equivalentes por milhão (ppm), para o U e o Th e % para o K porque nos aeroportos brasileiros não existem os denominados *pads*, que são fontes de calibração com quantidades conhecidas dos radionuclídeos envolvidos, sobre os quais o gamaespectrômetro da aeronave detecta o fluxo da radiação gama em cps e a transforma para ppm. Porém, recentemente, esforços tem sido desenvolvidos no sentido de transformar os levantamentos aerogamaespectrométricos nacionais de cps para ppm, de acordo com metodologia apresentada por Misener *et al.* (1977). Contudo, hoje, a gamaespectrometria terrestre dispõe de gamaespectrômetros de altíssima resolução e a calibração pode ser feita com segurança no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), no Rio de Janeiro.

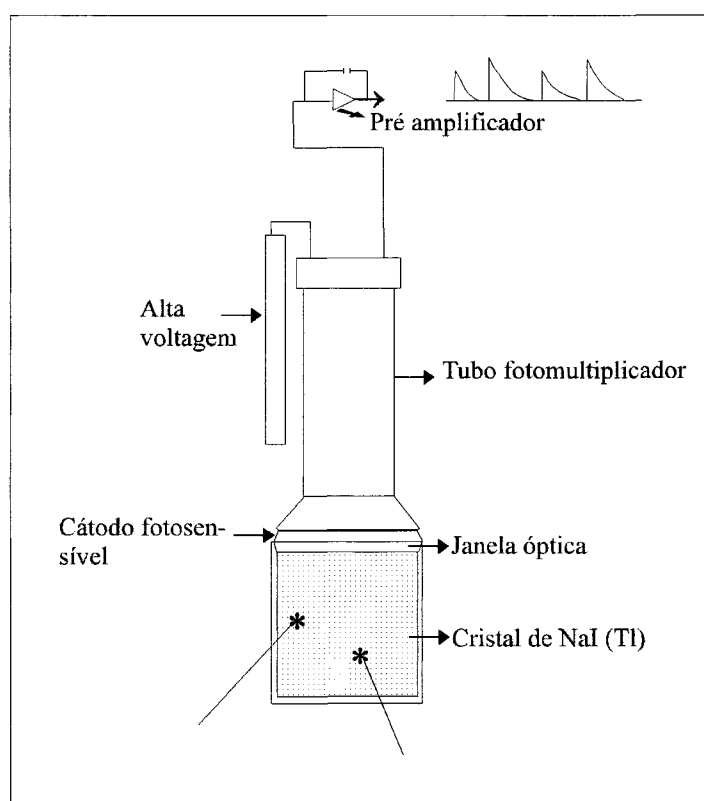
2.3 Detetores

Até a década de 50, não era possível se distinguir as diferentes energias das radiações gama (Bristow, 1979). O detector padrão, contador Geiger-Müller, indicava somente a contagem total, não discriminando as energias correspondentes ao potássio, ao urânio e ao

tório. Com o advento do detector de iodeto de sódio (NaI), ativado a tálio (TI), tornou-se possível registrar os pulsos de saída, proporcionais a energia da radiação gama detectada. Com a adição de circuitos eletrônicos capazes de selecionar e ler os pulsos de acordo com suas amplitudes, foi possível separar os três radioelementos de acordo com suas energias gama.

A Figura 8 mostra, esquematicamente, o detector de iodeto de sódio ativado a tálio - NaI(Tl). Os raios gama interagem com o cristal, provocando *flashes* de luz (cintilação), cujas intensidades são proporcionais a energia recebida pelo cristal. O tubo fotomultiplicador acoplado ao cristal, converte as cintilações correspondentes em sinais elétricos, os quais podem ser amplificados e selecionados por um circuito eletrônico, pela técnica de análise de pulsos.

FIGURA 8 - ESQUEMA DE UM DETECTOR
NAI (TI) DE RAIOS GAMA



Modificado de Bristow (1979)

Em aerogamaespectrometria, os detetores modificam o espectro consideravelmente. Dentre os principais aspectos responsáveis tem-se: a eficiência do detector; a sensibilidade direcional; a resolução e o tempo morto.

Segundo Minty (1997) a eficiência do detector pode ser considerada como uma medida da probabilidade na qual um fóton emitido de uma fonte irá interagir no detector com a perda

de uma quantidade finita de energia. Detetores de NaI(Tl) são muito mais eficientes na absorção de fótons de baixa energia do que fótons de alta energia. Esta é a razão de altas taxas de contagens em canais de energias mais baixas.

A sensibilidade direcional do detetor aerotransportado, como função de um diâmetro muito maior do cristal dirigido para a fonte (terreno), em contraposição a sua espessura, permite que o fluxo de raios gama tenha uma interferência mínima nas porções do cristal.

A resolução do detector reflete a capacidade deste em distinguir dois raios gama com energias ligeiramente distintas. Em levantamentos aerogamaespectrométricos, isto é usualmente definido como a largura do fotopico, na metade da amplitude máxima, dividida pela energia do fotopico. Resoluções típicas são de 10% para o ^{137}Cs a 0,662 MeV, e 7% para o ^{208}Tl a 2,615 MeV (Minty, 1997).

O tempo morto refere-se ao tempo finito requerido no espectrômetro para processar os fótons individuais. Este deve ser o menor possível, uma vez que o tempo de contagem total disponível é reduzido pelo tempo empregado para o processamento de todos os fótons detectados.

2.4 Fatores que Afetam as Medidas Aerogamaespectrométricas

Uma série de correções são necessárias para que se possa gerar os produtos finais de um levantamento aerogamaespectrométrico. As principais são: redução da radiação de fundo atmosférico (*background*), correção do efeito Compton, correção altimétrica, correção do tempo morto e conversão dos dados corrigidos em concentrações (% e ppm). Deve-se, entretanto, na interpretação de dados aerogamaespectrométricos, levar em consideração os efeitos ambientais que podem influenciar o espectro de raios gama.

2.4.1 Radiação do *Background*

De acordo com Minty (1997), qualquer radiação não originária do terreno é considerada como *background*, desde que não tenha nenhum significado geológico e precisa ser removida dos dados gamaespectrométricos observados. Existem quatro tipos de fontes de radiação do *background*: fluxo atmosférico do radônio, *background* cósmico, *background* da aeronave e produtos oriundos de explosões atômicas e acidentes nucleares.

2.4.1.1 Gás Radônio

O ^{222}Rn atmosférico e seus produtos, especialmente ^{214}Bi e ^{214}Pb , são os que mais contribuem com o *background*. O ^{222}Rn (gás radônio) é muito móvel, podendo escapar dos solos e fissuras de rochas para a atmosfera em resposta à ação das mudanças de temperatura e pressão. Seus filhos, ^{214}Bi e ^{214}Pb , atacam as partículas aéreas de solos (aerossóis) e poeiras, distribuindo-se em função dos movimentos do ar e dos padrões dos ventos. Foote (1969 *apud* Minty 1997), mostrou que o *background* atmosférico aumenta pela manhã e depois decresce com o transcorrer do dia, atribuindo-se este comportamento a ação da camada de inversão de temperatura, próxima à superfície terrestre, e sua subsequente estabilização ao entardecer. Durante o aquecimento é comum registrar-se na atmosfera um máximo de ^{214}Bi e ^{214}Pb próximo ao terreno no início da manhã, e um decréscimo durante o dia, como consequência da turbulência do ar, o qual mistura-se na porção mais baixa da atmosfera. Camadas de inversão de temperatura sobre depressões topográficas e lagos, freqüentemente, retém o Rn no terreno e, sob condições tranquilas, é possível medir diferenças na radioatividade atmosférica em locais distantes entre si por poucos quilômetros (Darnley & Grasty 1971 *apud* Minty 1997).

Minty *et al.* (1997) citam que o espectro aéreo do Rn e seus filhos é muito similar àquele do U e de seus produtos-filhos no terreno. Isto é devido ao principal emissor de raios gama, o ^{214}Bi , que ocorre abaixo do ^{222}Rn na série de decaimento do ^{238}U , e somente a intensidade relativa dos fotopicos distingue os dois espectros. Existem dois procedimentos que podem ser usados para se remover o *background* do Rn. O primeiro é um método de razão espectral, onde a intensidade relativa do fotopico da série do urânio é usada para determinar a contribuição ao espectro do U no terreno e do Rn no ar. O segundo utiliza-se de detetores *upward-looking*. O método da razão espectral requer espectros de multicanais, que tenham sido corrigidos do tempo morto, calibrada a energia e removidos os *backgrounds* da aeronave e cósmico. O método do detector *upward-looking*, requer somente uma janela de dados. Assim, o espectro de um segundo pode ser integrado sobre as janelas dos quatro canais convencionais, depois da calibração da energia, sendo suficientes apenas a calibração e remoção do *background* cósmico e da aeronave nos quatro canais. Uma descrição detalhada dos métodos da razão espectral e do detector *upward-looking* pode ser encontrado em Minty *et al.* (1997).

2.4.1.2 Radiação Cósmica e *Background* da Aeronave

A radiação cósmica de nosso sistema solar e das reações do sol com átomos e moléculas na atmosfera geram uma radiação secundária e complexa. Esta radiação interage com a aeronave e com o detector e produz uma radiação gama conhecida como *background* cósmico.

Na porção mais baixa da atmosfera esta radiação tem uma distribuição constante de energia, mas decresce em amplitude com o decréscimo da altitude, segundo Aviv & Vulcan (1983 *apud* Minty 1997). O efeito da interação cósmica com as rochas é pequeno, de acordo com Gregory (1960 *apud* Minty 1997), e variações no *background* cósmico no dia-dia devido a mudanças na pressão atmosférica são mínimas, de acordo com Grasty & Carson (1982 *apud* Minty 1997).

O *background* da aeronave refere-se a radiação devida a quantidades traços de K, U e Th na aeronave e equipamentos, bem como do próprio detector. Esta componente de *background* é constante (Minty, 1997).

De acordo com Minty *et al.* (1997), o procedimento utilizado para a remoção do *background* cósmico e da aeronave parte do princípio de que na baixa atmosfera o espectro cósmico tem uma forma aproximadamente constante, mas a sua amplitude decresce com a altitude. Também as energias maiores do que 3 MeV são provenientes da radiação cósmica, e espectrômetros aéreos habitualmente monitoram uma janela cósmica (geralmente entre 3-6 MeV) para estimar o *background* cósmico (vide Figura 6). A contribuição cósmica em alguns canais é portanto proporcional a contagem da janela cósmica, e se a forma do espectro cósmico for conhecida, então a contagem da janela cósmica pode ser usada para calcular a contribuição cósmica em algum canal. A expressão que estima o *background* cósmico e da aeronave, segundo os autores mencionados é:

$$N_i = a_i + b_i N_{\text{cos}}$$

onde:

N_i = taxa de contagem do *background* da aeronave + cósmico no canal i_n ;

N_{cos} = taxa de contagem na janela cósmica;

a_i = taxa de contagem do *background* da aeronave no canal i_n ;

b_i = contagem do *background* cósmico no canal i_n , normalizado para unidades de contagem na janela cósmica.

2.4.2 Efeito Compton

Em virtude do espalhamento Compton na superfície e no ar, de 2,62 MeV do ^{208}Tl , pode haver interferência nas janelas de baixa energia do U e do K, a partir de uma fonte pura de Th (Grasty, 1979). O mesmo ocorre com fontes de U que interferem no espectro de baixa energia do K, assim como na janela de alta energia do Th, em resposta à radiação do ^{214}Bi na série do decaimento do U. Devido ao pequeno poder de resolução dos detetores de NaI, as contagens decorrentes de uma fonte pura de K podem ser registradas no canal do U. As taxas de contagens nas janelas de baixa energia oriundas de fontes puras de U e Th são conhecidas como *stripping factors* e denominadas α , β e γ , onde:

α é igual a taxa das contagens nas janelas de U e Th, a partir de uma fonte pura de Th;

β é igual a taxa das contagens nas janelas de K e Th, a partir de uma fonte pura de Th;

γ é igual a taxa das contagens nas janelas de K e U, a partir de uma fonte pura de U.

Grasty (1979), introduziu os termos a, b e c para denominar os *stripping factors* inversos, assim:

a é a interferência do U na janela do Th;

b é a interferência do K na janela do Th;

g é a interferência do K na janela do U.

A interferência das janelas dos três radioelementos é mostrada na Figura 9, sendo os fatores identificados na Tabela 5, de acordo com Killeen (1979).

As equações das correções dos *stripping factors* (Grasty, 1997), são as seguintes:

$$\text{Th}_c = \text{Th} - \text{Th}_b;$$

$$\text{U}_c = \text{U} - \text{U}_b - \alpha \text{Th}_c;$$

$$\text{K}_c = \text{K} - \text{K}_b - \beta \text{Th}_c - \gamma \text{U}_c$$

onde,

K_b , U_b e Th_b são as contagens corrigidas do *background*;

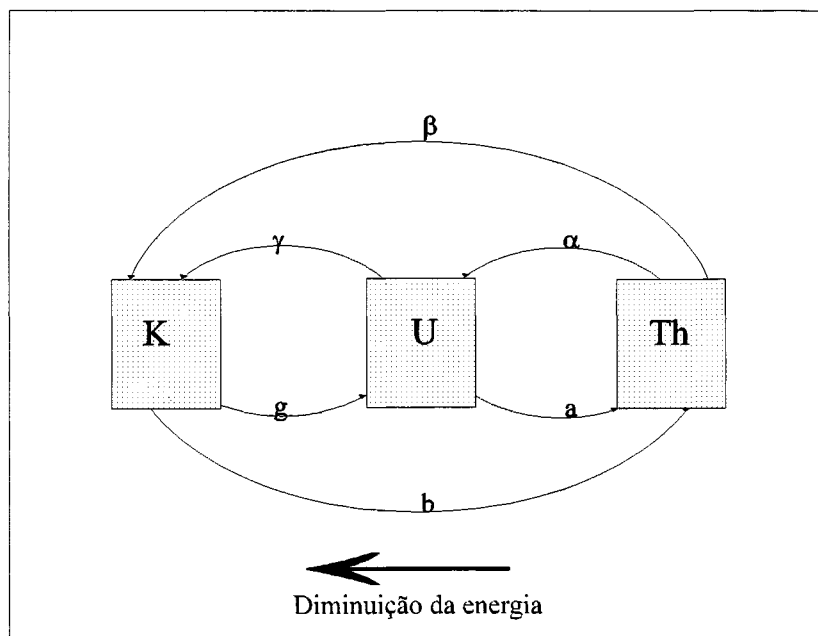
K, U e Th são as contagens não corrigidas;

K_c , U_c e Th_c são as contagens corrigidas.

Estas constantes de calibração são importantes porque permitem transformar as contagens medidas em levantamentos aerogamaespectrométricos em concentrações (% , ppm).

Esse procedimento utiliza os *pads*. Um detalhamento dos procedimentos adotados pode ser encontrado em Killeen (1979).

FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS INTERAÇÕES ENTRE AS JANELAS DO K, U E TH



Modificado de Grasty (1997)

TABELA 5 - *STRIPPING FACTORS*

<i>Stripping factors</i>	Fatores usados para a faixa do
α	Th na janela do U
β	Th na janela do K
γ	U na janela do K
a	U na janela do Th (normalmente pequeno)
b	K na janela do Th (zero)
g	K na janela do U (\cong zero)

Modificado de Killeen (1979)

2.4.3 Correção Altimétrica

É uma correção efetuada através de sobrevôos, em regiões preferencialmente planas e a diversas alturas. A equação que representa as contagens de cada janela, para o intervalo de alturas empregado em levantamentos aerogamaespectrométricos é representada por:

$$N = N_0 e^{-\mu(H-h)}$$

onde:

μ = derivado empiricamente do coeficiente de atenuação de altura para uma dada energia;

N_0 = contagem observada em condições normais de temperatura e pressão a uma altura h ;

N = contagem corrigida para uma altura H .

De acordo com Minty *et al.* (1997), esta equação é adequada para condições de topografias planas e alturas que variam entre 50 a 250 metros.

A altura da equação citada anteriormente pode ser corrigida de acordo com normas da IAEA (1991), uma vez que a temperatura e a pressão afetam a densidade e, conseqüentemente, as propriedades atenuantes do ar. A altura equivalente no padrão de temperatura (273,15 K) e pressão (101,325 kPa), ou seja h em CNTP, é dada por:

$$h_{\text{CNTP}} = (273,15 P h_{\text{obs}}) / (T + 273,15) + (101,325)$$

onde:

h_{obs} = altura observada sobre o nível do terreno (metros);

h_{CNTP} = altura equivalente em condições normais de temperatura e pressão - CNTP (metros);

T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

P = pressão barométrica (kPa).

2.4.4 Tempo Morto

Segundo Minty *et al.* (1997), os espectrômetros requerem um tempo finito para processar cada pulso do detector. Qualquer pulso que chega enquanto outro esteja sendo processado, é automaticamente rejeitado. Um tempo morto típico é da ordem de 5-15 μs /pulso, e pode ser corrigido de acordo com a seguinte equação:

$$N = n/(1-t)$$

onde:

N = taxa de contagem corrigida (contagem/segundo);

n = taxa de contagem observada (contagem por segundo);

t = tempo morto total (em segundos) para o intervalo de amostragem de um segundo.

De acordo com estes autores, a correção do tempo morto é geralmente muito pequena, mas pode ser significativa em áreas de alta radioatividade ou durante alguns procedimentos de calibração. O tempo morto pode ser experimentalmente medido pela conexão do espectrômetro a dois detetores idênticos, segundo IAEA (1991 *apud* Minty *et al.* 1997). O total da taxa de contagem é primeiramente medido com cada detetor conectado ao espectrômetro separadamente, e posteriormente com ambos conectados ao espectrômetro. A diferença entre a taxa de contagem medida com ambos os detetores conectados e o total da taxa de contagem medida pelos detetores individualmente, resulta numa medida direta do tempo morto do equipamento. A equação que representa o tempo morto por pulso é:

$$t = (2N - N_t) / Nn_t$$

onde:

N = média da taxa de contagem total do detetor individual (contagem/segundo);

N_t = total da taxa de contagem medida com ambos os detetores conectados (contagem/segundo);

t = tempo morto por pulso (segundos).

Este procedimento de calibração assume que o total de tempo morto é nt , onde n é o total de contagens registradas.

2.4.5 Conversão para Concentração

Através de vôos sobre áreas-teste, onde são conhecidas as concentrações dos radioelementos, é possível transformar as contagens por segundo em concentrações (% e ppm).

De acordo com Minty *et al.* (1997), as contagens dos radioelementos não são dependentes apenas de suas concentrações no terreno, mas também dos equipamentos usados e da altura do levantamento. O volume do cristal, a eficiência do detector e as larguras das janelas afetam as contagens e tornam difícil comparar resultados de dois levantamentos diferentes. As unidades medidas deveriam ter um significado geológico direto e serem

independentes do instrumento e dos parâmetros do levantamento. Contagens de levantamentos aéreos, por esta razão, deveriam ser convertidos para o nível médio de abundância dos radioelementos.

A conversão é feita geralmente pela divisão de cada um dos três canais corrigidos pelo coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade de cada janela é calculado pela seguinte expressão:

$$S = N / C$$

onde:

N = background médio corrigido e contagem corrigida para a altura nominal do levantamento;

C = concentração média no terreno;

S = coeficiente de sensibilidade.

2.4.6 Efeitos Ambientais

Segundo Minty (1997), fatores ambientais que podem influenciar a espectrometria de raios gama, incluem: sobrecargas não radioativas; temperatura do ar e pressão; precipitação; camada de inversão de temperatura; movimentos do ar e umidade do solo. A radiação emitida pela superfície terrestre pode ser reduzida significativamente, pelas altas densidades encontradas. Apenas 2 (dois) cm de cobertura, por exemplo, pode reduzir a radiação em até 35%. Em algumas áreas, vegetações densas podem ter a mesma capacidade de bloquear a fonte de radiação como se o detector estivesse a 50 m de altura. Os troncos das árvores em florestas densas também têm um efeito de colimação na radiação do terreno. Mudanças de temperatura e pressão podem induzir a uma variação na densidade do ar em até 30%. Um aumento de 10% da umidade do solo faz com que o fluxo da radiação da superfície seja atenuado na mesma ordem de grandeza. De acordo com Charbonneau *et al.* (1970 *apud* Minty 1997), a precipitação radioativa de partículas geradas pelos filhos do Rn na atmosfera pela chuva, pode induzir a um aumento aparente de mais de 2000% na concentração de U do terreno.

Mudanças na umidade do solo, cobertura vegetal e teor de Rn nas rochas e solos durante o curso do levantamento aéreo causam variações na radiação ao longo e entre as linhas. Alguns métodos, de acordo com Minty *et al.* (1997), são utilizados para corrigir os dados, como: nivelamento convencional, usando-se linhas de controle; informações de correlação entre os canais e micronivelamento.

- linhas de controle (*tie lines*): são linhas perpendiculares às linhas de produção e são espaçadas de aproximadamente dez vezes as distâncias entre aquelas linhas de produção. Podem ser usadas para nivelar os dados e para minimizar as diferenças entre os pontos de interseção.
- informações de correlação entre os canais: através da informação de correlação entre canais, é possível se remover os erros estimados do *background* da janela do U. O método, a partir dos dados corrigidos do *background*, supõe que as médias de U são uma função linear das médias de K e Th, e a correção é constante ao longo de cada linha.
- micronivelamento: os erros são removidos de um *grid* de dados, pela técnica de filtragem direcional do *grid*. É um método para remoção de tendências de dados aeromagnéticos, porém aplicável em dados aerogamaespectrométricos.

2.4.7 Outros Fatores

Dentre os outros fatores citados por Killen (1979), que influenciam as medidas aerogamaespectrométricas tem-se: o equilíbrio radioativo; a geometria e o arranjo das amostras; o volume das amostras; a soma e o empilhamento de pulsos.

O equilíbrio radioativo, como anteriormente citado, é de grande importância em levantamentos aerogamaespectrométricos. Ocorre quando se tem um sistema geoquimicamente fechado. Assim, pode-se determinar o total do pai na série do decaimento através da medida da radioatividade de qualquer filho. Entretanto, o equilíbrio radioativo de U, por exemplo, pode ser facilmente rompido em rochas devido a ação do intemperismo e pelas dispersões químicas e físicas. O grau de dispersão é regido por fatores como clima, hidrologia superficial e topografia. Regiões tropicais, onde o grau de lixiviação é grande, favorece a atenuação do conteúdo de informação dos raios gama em solos residuais.

O tamanho e a forma do detector influenciam a medida da radiação. Detectores portáteis ou aerotransportáveis são considerados de geometria 2π , e a geometria 4π , por exemplo, é aquela na qual a fonte engloba todo o detector, como no caso de perfilagens de poços. O volume da amostra pode ser afetado por fatores como a densidade e o coeficiente de absorção. O empilhamento de pulsos, ocorre quando dois raios gama alcançam simultaneamente o detector e são interpretados pelo aparelho como apenas um raio.

3 GEOQUÍMICA DOS RADIOELEMENTOS (U, Th, K e Ra)

3.1 Introdução

Todos os solos e rochas são radioativos e emitem radiação gama. As fontes dessa radiação são provenientes de:

- ^{40}K que representa 0,012% do K total (outros isótopos, ^{39}K e ^{41}K não são radioativos e representam respectivamente 93,2581% e 6,7302% do K total);
- produtos do decaimento do ^{238}U (99,2743% do U total);
- produtos do decaimento do ^{235}U (0,7200% do U total);
- produtos do decaimento do ^{234}U (0,0057% do U total);
- produtos do decaimento do ^{232}Th (100% do Th total).

A seguir são descritos, sucintamente, os comportamentos geoquímicos dos radioelementos U, Th, K e Ra na natureza.

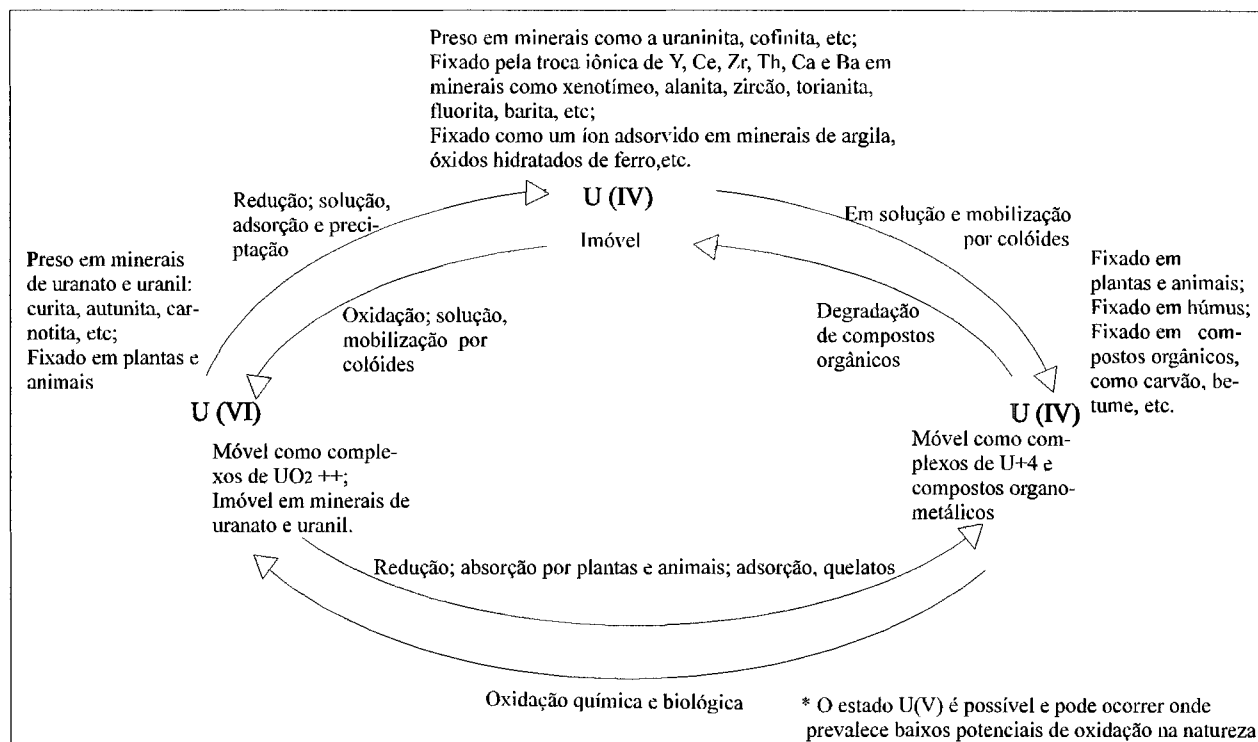
3.2 Urânio

Segundo Dickson & Scott (1997), na crosta terrestre, o urânio apresenta aproximadamente 3 ppm de abundância média. Sua química é dominada por dois estados de valência, U^{+4} e U^{+6} . A forma mais reduzida, o U^{+4} , geralmente está contido em minerais insolúveis. Contrariamente, a forma oxidada, o U^{+6} , complexa-se com ânions como os carbonatos, sulfatos e fosfatos para formar algumas espécies solúveis. A mobilidade do U^{+6} é modificada pela adsorção a óxidos hidratados de ferro, minerais de argila e colóides, como também pela redução a minerais de U^{+4} quando depara-se em ambientes redutores. A sua presença nas rochas ocorre como: óxidos e silicatos, uraninita e uranotorita; principalmente em minerais como a monazita, o xenotímeo e o zircão; como quantidades traço em outros minerais formadores de rocha; ou ainda ao longo dos limites dos grãos, possivelmente como óxidos ou silicatos de urânio. Dos principais minerais que “carregam” o urânio, somente a monazita e o zircão são estáveis durante o intemperismo. O urânio libertado dos minerais, pode ser retido em óxidos de ferro e minerais de argila ou precipitado em condições redutoras, formando-se os depósitos de urânio em circunstâncias favoráveis.

O ciclo de interações do urânio na natureza é mostrado na Figura 10. Boyle (1982), cita que devido a similaridade do urânio (como o raio iônico, a carga e a eletronegatividade), este pode substituir elementos como: Y no xenotímeo; Zr no zircão e outros minerais de zircônio; Th na torianita; Ce na monazita, alanita e outros minerais de cério; Ba na barita e outros minerais de bário; Ca na apatita e na fluorita. Este último tipo de substituição, do Ca pelo urânio na apatita, desperta o interesse de se investigar fontes uraníferas nos fertilizantes introduzidos ao solo pela atividade agrícola, uma vez que no Brasil, devido as características de solos tropicais, há pouca disponibilidade de fósforo às culturas, acarretando uma intensiva utilização de fertilizantes fosfatados na maioria das grandes culturas do País.

Assim, apesar de geoquimicamente os solos (Latosolos Roxos) provenientes do intemperismo de rochas básicas da área de estudo da presente pesquisa, de acordo com a literatura, mostrarem baixos teores de radionuclídeos, é possível pensar em uma eventual contaminação de urânio proveniente de fertilizantes fosfatados, associada à retenção de U nas argilas decorrente dos processos pedogenéticos, uma vez que as respostas aerogamaespectrométricas de U e Th revelaram-se anômalas em algumas porções desta classe de solos.

FIGURA 10 - CICLO DE INTERAÇÕES DO U^{+4} E DO U^{+6} NA NATUREZA



Modificado de Boyle (1982)

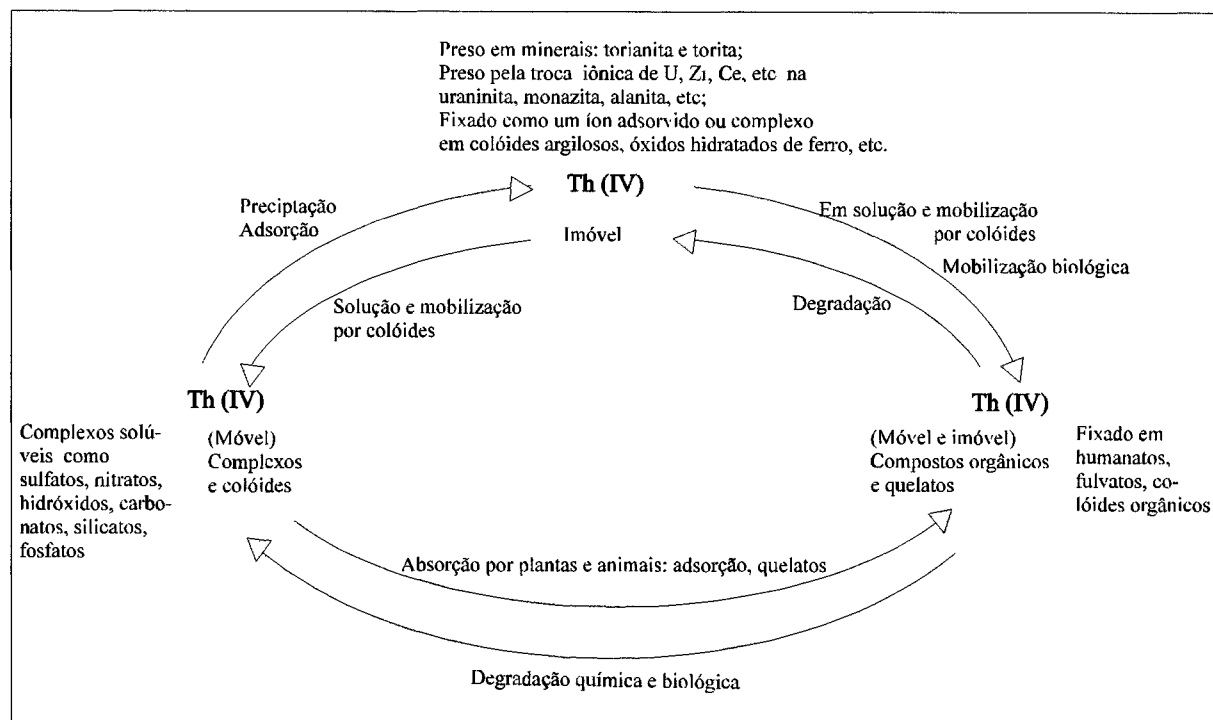
3.3 Tório

A concentração média do tório na crosta é aproximadamente de 12 ppm, constituindo-se o segundo elemento da série dos actnídeos. Apesar de apresentar dois estados de oxidação, Th^{+3} e Th^{+4} , geoquimicamente, este último estado de valência é de grande importância, uma vez que o primeiro é raro na natureza e instável em ambiente aquoso (Boyle, 1982). A solubilidade de complexos de tório é geralmente baixa, exceto em soluções ácidas, de acordo com Langmuir & Herman (1980 *apud* Dickson & Scott 1997). Entretanto, compostos orgânicos, como os ácidos húmicos, podem aumentar a solubilidade do Th em condições de pH neutro (Chopin 1988 *apud* Dickson & Scott 1997).

A complexidade das interações do tório na natureza pode ser verificada na Figura 11. Devido a semelhança química do tório com elementos como o zircônio, hafnínio e certos elementos terras raras, especialmente o cério (Boyle, 1982), os minerais formados por estes elementos, são passíveis de conter Th através de substituições iônicas. Assim, são freqüentes as seguintes trocas: de Zr por Th, em minerais de zircão; Y, Ce e outros lantanídeos por Th na maioria de minerais de terras raras; U por Th em certos minerais de urânio como resultado da similaridade dos raios iônicos. Presos em minerais de torianita e torita, ou pela substituição iônica de elementos quimicamente semelhantes, ou ainda fixados pela adsorção em complexos coloidais argilosos e em óxidos/hidróxidos de ferro, o tório tetravalente só é transportado, quando os colóides são incorporados à solução do solo ou ainda se os mesmos sofrerem uma mobilização biológica. A mobilidade do Th na forma de complexos e de colóides também pode ocorrer em complexos solúveis de sulfatos, nitratos, carbonatos, fosfatos, silicatos, orgânicos, etc.

Segundo Dickson & Scott (1997) o tório pode ocorrer em alanita, monazita, xenotímeo e zircão, em níveis maiores que 1000 ppm ou em quantidades-traço em outros minerais constituintes das rochas. Os principais minerais que contém Th (monazita e zircão) são estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em depósitos de minerais pesados. O tório liberado durante o intemperismo, pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Fe ou Ti e em argilas. Como o U, o Th pode também ser transportado quando adsorvido em colóides argilosos e óxidos de ferro.

FIGURA 11 - CICLO DE INTERAÇÕES DO Th^{+4} NA NATUREZA



Modificado de Boyle (1982)

3.4 Potássio

O potássio, com uma proporção de 2,35% na crosta terrestre é um elemento alcalino e mostra uma química simples. A principal ocorrência de K em rochas é nos feldspatos potássicos (principalmente no ortoclásio e no microclínio com ~ 13% de K) e nas micas (biotita e muscovita com aproximadamente 8% de K). Segundo Fertl (1983 *apud* Dickson & Scott 1997), o potássio está praticamente ausente em minerais máficos. Em decorrência, é relativamente alto em rochas félsicas (granitos), mas baixo em basaltos e muito baixo em dunitos e peridotitos. O comportamento do K frente ao intemperismo, determina os teores do radioelemento ^{40}K nas rochas intemperizadas e nos solos. Durante o intemperismo, a maior parte do K é destruída nos minerais na seguinte ordem: biotita \rightarrow feldspatos potássicos \rightarrow muscovita. O potássio liberado durante o intemperismo pode participar da formação de minerais como a illita, ou então ser adsorvido em quantidades menores em outras argilas, como por exemplo a montmorilonita, sob condições adequadas. A eficiente *uptake* (captura) de K pelas argilas é refletida nas baixas concentrações de K nas águas dos oceanos (380 ppm).

O potássio é detectado em levantamentos de raios gama pela medição de 1,46 MeV emitida pelo decaimento do ^{40}K . Este isótopo constitui 0,012% do K natural e permite uma medida direta do teor de K no terreno.

3.5 Rádio

A geoquímica do Ra também deve ser considerada, uma vez que isótopos de Ra são membros tanto da série de decaimento do U como do Th e sua mobilidade pode ser uma fonte de desequilíbrio em ambas as séries. Dickson (1990 *apud* Dickson & Scott 1997) cita que o Ra pode ser mobilizado na maioria das águas subterrâneas, principalmente naquelas com alta salinidade. A mobilidade do Ra é limitada pela coprecipitação com sulfatos de bário, sulfatos ou óxidos de Mn-Fe, ou através da adsorção pela matéria orgânica. Depósitos de rádio ao longo das margens de lagos salgados são formas comuns de desequilíbrio radioativo na Austrália. Estes raramente contêm mais U do que o *background*, mas podem ter ^{228}Ra e ^{226}Ra , segundo Dickson & Scott (1987 *apud* Dickson & Scott 1997).

3.6 Distribuição dos Radioelementos nas Rochas

A Tabela 6 mostra os teores médios de tório e de urânio em algumas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

TABELA 6 - TEOR MÉDIO DE TÓRIO E URÂNIO EM ALGUMAS ROCHAS ÍGNEAS, SEDIMENTARES E METAMÓRFICAS

Tipo de rocha	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U
Rochas ígneas			
Ultrabásicas (peridotito, dunito, etc.)	0,1	0,02	5
Kimberlitos	12	4,5	2,6
Lamprófios	15	5	3
Intrusivas extrusivas e básicas (gabro, basalto, etc.)	3	0,6	5
Intermediárias extrusivas e intrusivas (diorito, andesito, etc.)	5	2	2,5
Intrusivas extrusivas e ácidas (granito, riolito, etc.)	15	4,5	2,5
Sienitos ricos em álcalis, álcali granitos, etc.	> 100	> 100	1
Rochas sedimentares			
Arenitos, grauvas, conglomerados	5	1,5	3,3
Folhelhos, argilitos	12	3,5	3,4
Folhelhos pirobetuminosos	> 20	> 1200	-
Lignita, carvão	> 100	> 1000	-
Formação ferrífera bandada	3	2	1,5
Anidrita, gipsita	0,2	0,1	2
Tufos (composição ácida e intermediária)	6	3	2
Fosforita (oceânica)	> 12	> 300	-
Rochas metamórficas			
Quartzitos, meta-grauvas, meta-conglomerados	5,0	1,5	3,3
Mármore e metadolomitos	1	0,5	2
Xistos (ortoderivados)	6	2	3
Xistos (paraderivados)	10	2	5
Anfibolitos	2	0,5	4
Greenstone (meta-andesito, meta-basalto)	2	0,5	4
Gnaisses e granulitos	10	3	3,3
Serpentinitos	0,1	0,02	5

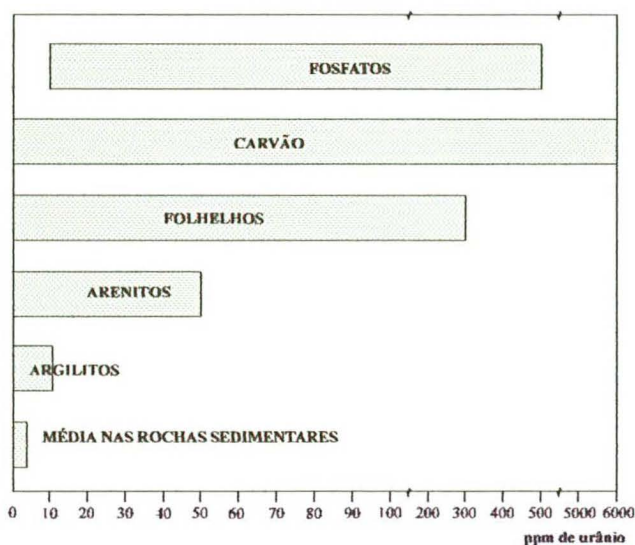
Modificado de Boyle (1982)

Rochas ígneas apresentam variações quanto aos teores de potássio, urânio e tório. O mais abundante dos três elementos é o potássio o qual é encontrado em feldspatos alcalinos e micas. Urânio e tório quando presentes em rochas ígneas, estão principalmente associados a minerais moderadamente radioativos, ou ocorrem nos interstícios de minerais ou inclusões

fluidas. Assim, teores de radionuclídeos em rochas ácidas (3,5% K; 4,1 ppm U; 21,9 ppm Th) são maiores do que em rochas ultrabásicas (0,01%K; 0,007 - 0,8 ppm U; 0,02 - 3,4 ppm Th) (Saunders, 1976). Espera-se, portanto, que solos derivados de rochas básicas, como os diabásios, apresentem radiação gama inferior àqueles solos provenientes do intemperismo de rochas ácidas.

Estima-se em aproximadamente 3 ppm o teor médio de urânio em rochas sedimentares (Gross, 1980). A Figura 12 mostra que alguns sedimentos como os folhelhos, os carvões e os fosfatos, apresentam teores de urânio bem mais elevados do que aquela média.

FIGURA 12 - VARIAÇÃO NOS TEORES DE URÂNIO DE ALGUMAS ROCHAS SEDIMENTARES

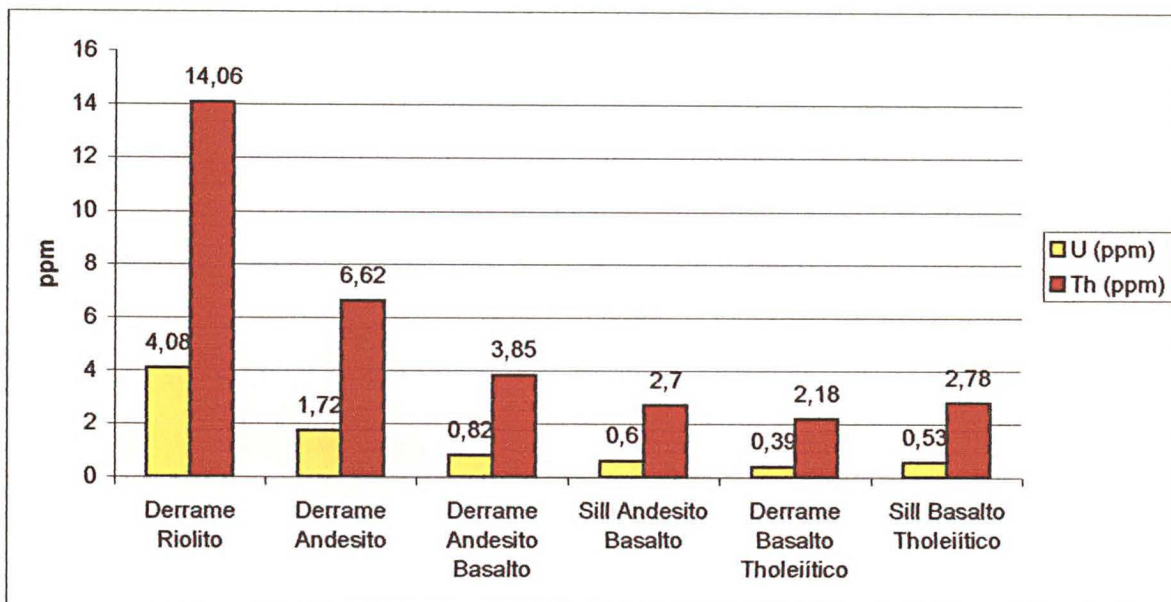


Modificado de Gross (1980)

Resultados de U e Th realizadas por Marques (1988) em amostras de rochas ácidas, intermediárias e básicas da Bacia do Paraná são mostrados na Figura 15. Esta Figura representa as médias calculadas dos teores de U e Th realizadas em: 18 amostras de rochas provenientes de Derrames de Riólito; 15 amostras de Derrame de Andesito; 42 amostras de Derrame Andesito/Basalto; 5 amostras de *Sill* Andesito/Basalto; 21 amostras de Derrame Basalto/Tholeiítico; *Sill* Basalto/Tholeiítico.

Verifica-se que as amostras de rochas ácidas, como os riólitos, mostram os maiores valores de U e Th quando comparadas com as amostras de rochas intermediárias (andesitos) e básicas (andesitos basaltos e basaltos tholeiíticos).

FIGURA 13 - MÉDIA DE U e Th EM ROCHAS DA BACIA DO PARANÁ



Fonte: Marques (1988)

Análises dos teores de radionuclídeos de rochas da Austrália foram realizadas por Scott & Dickson (1990 *apud* Dickson & Scott 1997). A Tabela 7 mostra estes resultados. O exame dos teores nas rochas ígneas mostra que existe uma tendência de aumento do radioelemento com o incremento de Si, apesar das diferenças das concentrações entre K, U e Th.

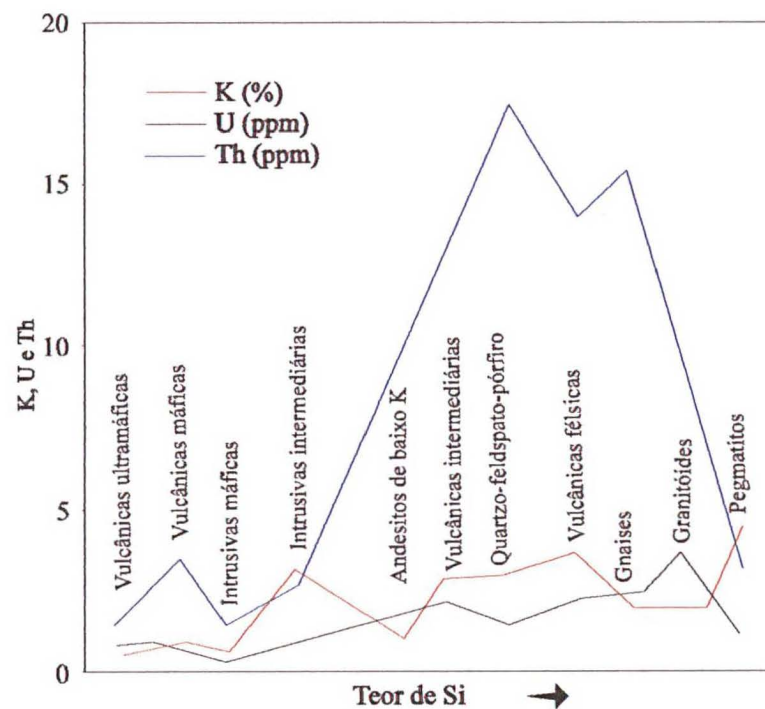
A Figura 14 mostra que rochas félsicas têm maiores teores do que as rochas básicas e ultrabásicas. Geralmente, o Th mostra um aumento muito maior do que o U e razões como Th/U podem ser usadas para investigar o grau de diferenciação no contexto de suítes ígneas. As rochas formadas nos últimos estágios de diferenciação magmática tendem a concentrar U e Th.

Dickson & Scott (1997) ressaltam que dentro de um dado tipo de rocha, existe uma ampla variação das concentrações dos radioelementos, como pode ser verificado nos dados da Tabela 7. Devido a grande dispersão dos teores em cada classe de rocha, não é possível estabelecer uma classificação petrográfica com base nas concentrações de radionuclídeos. Por exemplo, uma rocha com teores médios de 2,5% de K; 3 ppm de U e 15 ppm de Th, pode ser um granito, uma rocha félsica intrusiva/extrusiva, uma extrusiva intermediária ou um folhelho. Uma rocha com baixos teores de radioelementos (< 1% de K; < 1 ppm de U; < 5 ppm de Th), pode representar ser qualquer litologia exceto uma intrusiva félsica ou um folhelho. Contudo,

segundo estes autores, em pequenas regiões, diferentes tipos de rochas podem ser identificadas com base na concentração relativa dos radioelementos.

A avaliação de dados de rochas metamórficas (rochas gnáissicas derivadas de granitos e anfibolitos derivados de dolerito) e sedimentares, também foi discutida por Dickson & Scott (1997). Tais autores sugerem que o metamorfismo não afeta os teores dos radioelementos das rochas metamórficas. As rochas sedimentares geralmente têm concentrações que refletem as rochas de origem. Assim, pode-se esperar que sedimentos imaturos de fontes graníticas, contenham teores altos de radionuclídeos, enquanto sedimentos mais maduros, constituídos principalmente de quartzo, devem revelar índices radioativos muito mais baixos.

FIGURA 14 - VARIAÇÕES NOS TEORES MÉDIOS DE K, U E Th DE ROCHAS ÍGNEAS COM O AUMENTO DO TEOR DE Si



Modificado de Dickson & Scott (1997)

TABELA 7 - TEORES DE RADIOELEMENTOS EM ROCHAS DA AUSTRÁLIA

Tipo de rocha	Rocha		
	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Intrusivas			
Granitóides	0,3 - 4,5 (2,4)	0,4 - 7,8 (3,3)	2,3 - 4,5 (16,0)
Rochas gnáissicas	2,4 - 3,8 (2,4)	2,1 - 3,6 (2,5)	18,0 - 55,0 (15,0)
Pegmatito	2,6 - 5,5 (3,7)	0,3 - 1,0 (0,7)	0,3 - 9,6 (2,0)
Aplitos	0,6 - 4,0 (2,4)	1,0 - 8,0 (3,3)	3,0 - 20,0 (7,0)
Quartzo-feldspatos pórfiros	1,0 - 5,0 (2,9)	1,3 - 2,9 (1,7)	6,0 - 14,0 (13,0)
Intrusivas intermediárias	0,7 - 5,6 (2,7)	0,1 - 1,2 (0,8)	0,8 - 6,1 (2,4)
Intrusivas máficas	0,1 - 0,8 (0,4)	0,0 - 1,1 (0,3)	0,0 - 3,1 (1,2)
Extrusivas			
Vulcânicas félsicas	2,0 - 4,4 (3,7)	1,4 - 13 (2,4)	13,0 - 28,0 (17,0)
Vulcânicas intermediárias	1,8 - 4,1 (2,7)	0,9 - 5,6 (2,3)	1,5 - 15,0 (9,0)
Andesitos com K- baixos	0,7 - 0,9 (0,8)	1,0 - 2,5 (1,6)	3,0 - 8,0 (5,0)
Vulcânicas máficas	0,3 - 1,3 (0,9)	0,3 - 1,3 (0,7)	2,0 - 5,0 (3,0)
Vulcânicas ultramáficas	0,2 - 0,9 (0,4)	0,3 - 0,9 (0,6)	0,0 - 4,0 (1,2)
Sedimentares			
Folhelhos do Arqueano	0,4 - 1,6 (0,9)	0,3 - 1,3 (0,9)	1,0 - 5,0 (2,7)
Outros folhelhos	0,1 - 4,0 (2,6)	1,6 - 3,8 (2,6)	10,0 - 55,0 (19,0)
Arenitos	0,0 - 5,5 (1,8)	0,7 - 5,1 (2,3)	4,0 - 22,0 (12,0)
Carbonatos	0,0 - 0,5 (0,2)	0,4 - 2,9 (1,4)	0 - 2,9 (1,4)

Modificado de Dickson & Scott (1997)

3.7 Distribuição dos Radioelementos nos Solos

De acordo com Boyle (1982) os teores de urânio e tório nos solos são altamente variáveis. Em solos ditos normais, o urânio apresenta valores que variam desde menores que 1 ppm até 8 ppm, com uma média de 1 ppm. Em áreas uraníferas, valores superiores a 50 ppm não são incomuns. Em muitos solos normais, o horizonte A é o mais rico em urânio, mas o horizonte C, sobre ou próximo a áreas de depósitos uraníferos, é geralmente o mais enriquecido em urânio. O teor de urânio em solos depende essencialmente do material que lhes deu origem, sendo os valores mais altos aqueles desenvolvidos em rochas graníticas, gnáissicas e rochas ígneas alcalinas, enquanto os mais baixos são encontrados em rochas ígneas básicas e rochas carbonáticas. Boyle (1982) cita também que a solução, migração e precipitação do

urânio em solos é altamente dependente de fatores como pH, co-precipitação e adsorção de íons de urânio por vários colóides do solo, minerais de argila, óxidos e hidróxidos de ferro, hidróxidos de titânio, hidróxidos de zircônio, óxidos hidratados de manganês e reação com matéria orgânica (húmus) e com microorganismos. As condições climáticas também influenciam os teores de U, uma vez que geralmente o urânio é mais móvel em solos de regiões semi-áridas quentes do que em solos de regiões temperadas e tropicais, provavelmente devido aos baixos teores de matéria orgânica. Durante o desenvolvimento dos solos, quantidades consideráveis de urânio são lixiviadas pelo intemperismo, quando comparadas com o tório, portanto aumentando a razão Th/U em relação a rocha fonte.

Já o tório, de acordo com Boyle (1982), apresenta valores de 0,1 a 50 ppm nos solos. A média é baixa, de aproximadamente 5 ppm. Assim como o urânio, o teor deste radioelemento nos solos depende essencialmente do tipo de material de origem, sendo os maiores valores oriundos de rochas graníticas, rochas ígneas alcalinas, xistos e gnaisses, e os mais baixos em rochas ígneas básicas e rochas carbonáticas. Excepcionalmente, altos teores de tório (200 a 1000 ppm ou mais) podem estar presentes em certos solos, argilas, lateritas e bauxitas desenvolvidos em rochas alcalinas e carbonatitos, como também na proximidade de veios de pegmatitos, que contém tório. Nos solos, a maioria do Th está presente no zircão, esfeno, torianita e torita; parte distribui-se numa variedade de minerais secundários como a torogumita e a badeleita. Os resíduos permanecem em maior parte nas frações de argila, na limonita e em complexos bauxíticos. Durante o desenvolvimento dos solos, a razão Th/U tende a crescer devido principalmente a mobilidade diferencial destes dois elementos durante o intemperismo.

De acordo com Oliveira *et al.* (1992), cada solo é produto do efeito de todos os seus fatores de formação (clima, relevo, seres vivos, material de origem e tempo). É resultado de ações, condicionamentos e interações envolvendo diversificadamente tais variáveis. O clima e os seres vivos exercem ações modificadoras, fornecendo energia e compostos líquidos, gasosos e sólidos orgânicos; o relevo é responsável por condicionamentos modificadores das ações anteriores, similarmente ao tempo, que é responsável pelas ações exercidas; o material de origem responde pela diversidade da matéria-prima fundamental, passível das modificações que se venham a operar a medida que se procede a formação dos solos.

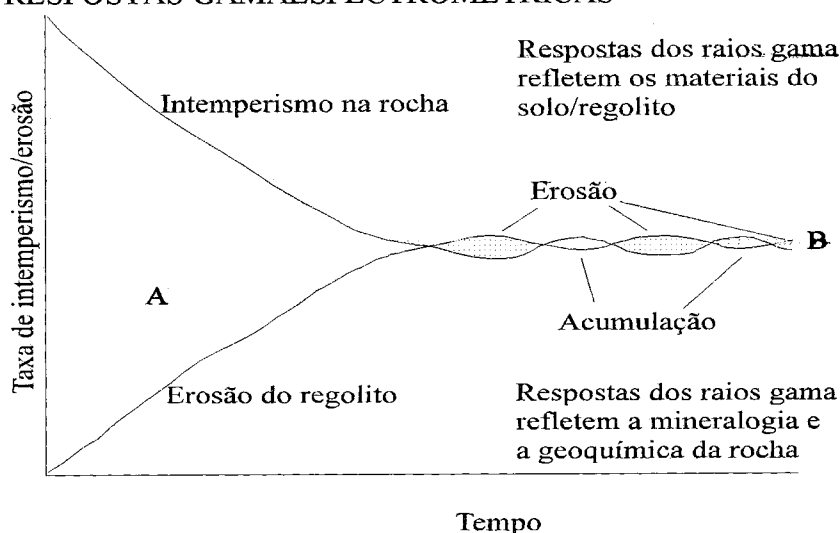
Segundo Wilford *et al.* (1997), durante o intemperismo químico e físico, os radioelementos são liberados da rocha, redistribuídos e incorporados ao regolito/solo (intemperizado *in situ* ou proveniente de transporte). Em muitos casos, as características dos

radioelementos de regolitos podem diferir significativamente da fonte, devido a reorganização textural e geoquímica que ocorre no perfil intemperizado.

O desenvolvimento de um perfil pedológico em uma paisagem, dependerá do balanço entre a taxa de intemperismo e a razão pela qual este material intemperizado está sendo removido (Wilford *et al.*, 1997). A Figura 15 mostra um diagrama dos fatores que afetam a denudação da paisagem e os seus efeitos nas respostas dos raios gama.

Em **A** o intemperismo é maior do que a taxa de erosão, resultando no desenvolvimento do regolito; em **B**, as taxas de intemperismo e erosão são semelhantes, resultando em um regolito permanentemente jovem. Nas áreas de erosão ativa, as respostas dos raios gama refletem a geoquímica e a mineralogia do material de origem, enquanto que nas áreas de acumulação a resposta é modificada pela pedogênese. As porções mais estáveis na paisagem são aquelas onde a taxa de intemperismo excede a taxa de erosão. Perfis intempéricos desenvolvem-se e são preservados em áreas estáveis com pouca declividade e onde as taxas de erosão são relativamente baixas. Portanto, o balanço da denudação da paisagem (taxa relativa de formação do regolito versus taxa de erosão) pode ser determinado utilizando-se levantamentos aerogamaespectrométricos, como mostrado na Figura 16, que é a representação esquemática de uma imagem aerogamaespectrométrica sobre o modelo de elevação digital do terreno (*DEM*) de Ebagoola (Austrália) expondo o saprolito granítico, aluviões derivados da escarpa e os solos silicosos residuais.

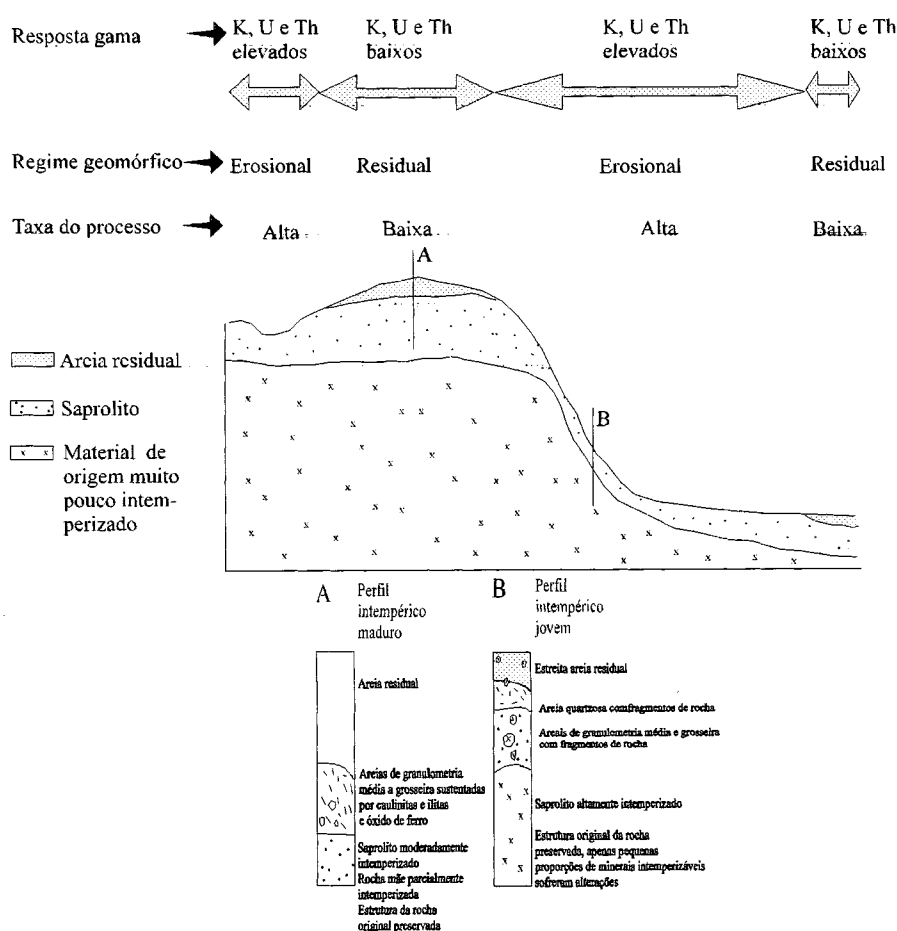
FIGURA 15 - DIAGRAMA DOS FATORES QUE AFETAM O BALANÇO DA DENUDAÇÃO NA PAISAGEM E SUAS RESPOSTAS GAMAESPECTROMÉTRICAS



Modificado de Crozier (1986 *apud* Wilford *et al.* 1997)

Wilford *et al.* (1997), ressaltam ainda que nem todos os valores baixos de K e elevados de U e Th na resposta gama estão associados com substratos altamente intemperizados. A interpretação do grau de intemperismo e as respostas gama requerem a compreensão das características dos radioelementos na rocha mãe, bem como do material intemperizado. Assim, deve-se tomar muita precaução quando estas relações são utilizadas no processo de interpretação de levantamentos aerogamaespectrométricos, dependendo da natureza do material de origem e da história do intemperismo.

FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE AS RESPOSTAS DE RAIOS GAMA, TIPOS DE SOLOS/REGOLITO E PROCESSOS GEOMÓRFICOS



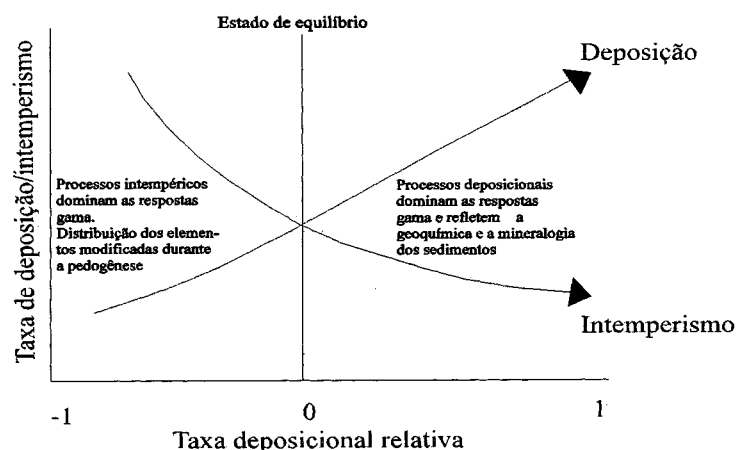
Modificado de Wilford *et al.* (1997)

Segundo Wilford *et al.* (1997), interpretação de imagens da radiação gama podem ser usadas para mostrar o grau de intemperismo e a atividade deposicional relativa em ambientes fluviais. Os autores verificaram em canais recentemente depositados de fontes graníticas e metamórficas elevados valores de K, Th e U (coloração branca na imagem). A resposta dos

radioelementos refletiram a química das rochas das quais estes sedimentos foram derivados. Sugeriram que a erosão, o transporte e a deposição dos sedimentos foram relativamente rápidos, com pouco tempo para que o intemperismo modificasse a composição dos radioelementos da fonte original de rocha. Em contrapartida, terraços aluvionares mais antigos, também derivados de rochas graníticas e metamórficas, mostraram valores baixos de K e relativamente maiores valores de U e Th. Segundo estes autores, tais diferenças provavelmente refletiram os contrastes texturais e de composição entre os bancos arenosos e os sedimentos mais finos e a modificação dos radioelementos pela pedogênese e lixiviação.

Assim, a Figura 17 mostra que as respostas dos raios gama em regimes deposicionais mais ativos (mais recentes, menos estáveis), refletem a geoquímica e mineralogia das rochas da qual os sedimentos foram derivados; enquanto que em sistemas deposicionais mais estáveis, as respostas refletem os processos do intemperismo.

FIGURA 17 - RESPOSTAS DOS RAIOS GAMA EM
RELAÇÃO AO INTEMPERISMO E A DEPOSIÇÃO

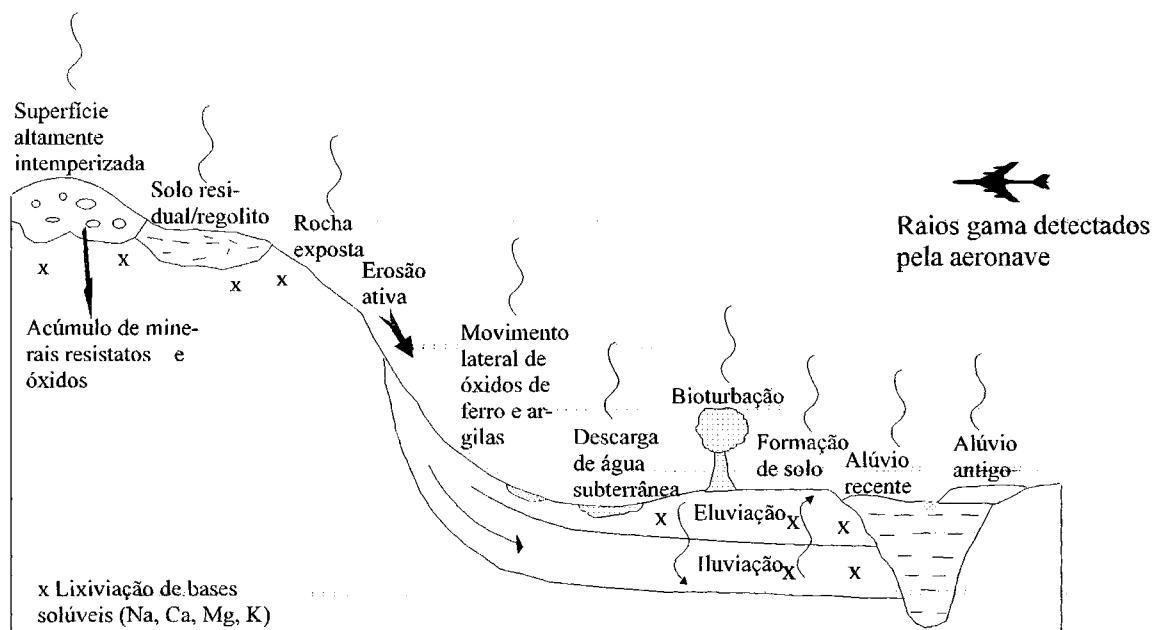


Modificado de Wilford *et al.* (1997)

As fontes de raios gama que emanam da superfície do terreno podem ser classificadas em primárias e secundárias (Wilford *et al.*, 1997). As fontes primárias refletem a geoquímica e a mineralogia da rocha. As fontes secundárias estão relacionadas com a modificação e a distribuição dos radioelementos pelo intemperismo e pedogênese. Os fatores que afetam as respostas dos raios gama a partir de um substrato litológico homogêneo são mostrados na Figura 18. A análise da referida ilustração mostra que os raios gama detectados pela aeronave refletirão vários cenários como: a mineralogia e a geoquímica primárias do material de origem; a natureza de materiais intemperizados; a dinâmica das águas e os processos geomórficos

atuantes na paisagem. A pedogênese, então, é um fenômeno importante na identificação e na distribuição dos radioelementos na superfície.

FIGURA 18 - DIAGRAMA DOS FATORES QUE AFETAM AS RESPOSTAS DOS RAIOS GAMA SOBRE O MESMO TIPO DE MATERIAL DE ORIGEM



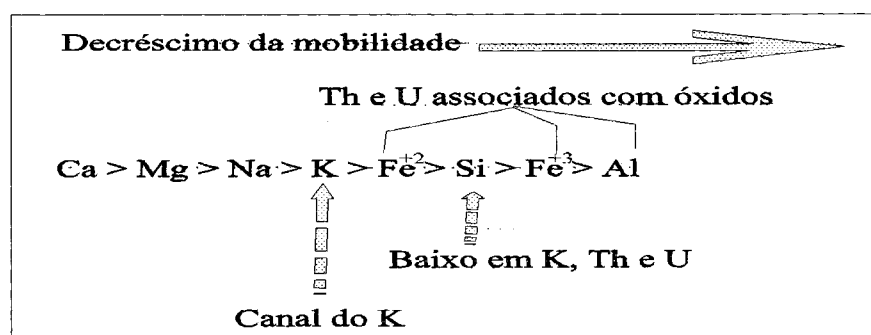
Modificado de Wilford *et al.* (1997)

Conforme já mencionado, durante o intemperismo, os radioelementos são liberados dos principais minerais constituintes e incorporados nas argilas, óxidos de ferro, água subterrânea e matéria orgânica. O potássio é geoquimicamente móvel e solúvel na maioria das condições de intemperismo. Durante este processo, o K é depreendido dos minerais primários, como os feldspatos potássicos e as micas, adsorvido em minerais de argila, como a illita e a montmorilonita e em menores proporções na caolinita. O U e o Th são bem menos móveis que o K. O urânio é liberado de minerais solúveis em condições oxidantes. Concentrações de urânio podem estar associadas com minerais resistentes, como a monazita e o zircão, argilas ou ^{226}Ra exsolvido da água subterrânea. O Th também está relacionado com minerais resistentes e tende a se concentrar no perfil do regolito e pode ser altamente móvel, quando combinado com complexos orgânicos nas águas subterrâneas e nos solos. O urânio e o tório, quando liberados durante o intemperismo, tendem rapidamente a serem adsorvidos nos minerais de argila e coprecipitados com óxidos de ferro nos solos (Wilford *et al.*, 1997). Geralmente estes radionuclídeos estão associados com a fração silte-argila e sesquióxidos nos solos, tendendo a se concentrar em perfis altamente intemperizados, ao contrário do que ocorre em relação ao K.

Este exibe altos teores em perfis poucos intemperizados (dependendo da rocha mãe) e baixos em regolitos altamente intemperizados (maduros).

A sequência abaixo (Figura 19) mostra a mobilidade relativa dos principais elementos constituintes das rochas, os quais são liberados durante o intemperismo, e suas respostas gamaespectrométricas.

FIGURA 19 - MOBILIDADE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS E RESPOSTAS DOS RAIOS GAMA



Modificado de Wilford *et al.* (1997)

Wilford *et al.* (1997), ressaltam que esta sequência é generalizada e pode mudar de acordo com as condições ambientais, como aquelas onde os cátions de minerais primários intemperizados (K^+ , Na^+ , Ca^{+2}) tendem a ser incorporados aos minerais de argila (esmectita e illita), ou perdidos na solução. O avanço do intemperismo está associado com o desenvolvimento de argilas caoliníticas e acumulação de sílica, óxidos de ferro e alumínio. A carência de radioelementos no quartzo pode ser usada para mapear solos altamente silicosos. O canal do K e das razões K/Th e K/U podem ser usados para estimar o grau de intemperismo ou lixiviação, uma vez que a resposta do K está associada com minerais facilmente intemperizáveis, enquanto o Th e o U estão normalmente vinculados com argilas residuais, óxidos e minerais acessórios.

Segundo Dickson & Scott (1997), a relação entre os radioelementos da cobertura superficial e da rocha subjacente é de grande importância na aplicação de levantamentos aerogamaespectrométricos em mapeamentos geológicos e de solos, ressaltando que são muito raros dados e teores de radioelementos em solos. Segundo estes autores, os solos apresentam um potencial de desequilíbrio radiométrico.

Os teores de radioelementos em solos desenvolvidos de vários tipos de rochas são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 - TEORES DE RADIOELEMENTOS DE SOLOS DERIVADOS DE ROCHAS DA AUSTRÁLIA

Tipo de rocha	Solo		
	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Intrusivas			
Granitóides	0,4 - 3,9 (2,1)	0,5 - 7,8 (2,7)	2,0 - 37,0 (13,0)
Rochas gnaissicas	0,7 - 1,9 (1,3)	1,6 - 3,8 (2,2)	6,0 19,0 (12,0)
Pegmatito			
Aplitos			
Quartzo-feldspatos			
pórfiros			
Intrusivas intermediárias	0,7 - 3,4 (1,6)	1,5 - 2,3 (1,9)	2,9 - 8,4 (5,6)
Intrusivas máficas			
Extrusivas			
Vulcânicas félsicas	1,8 - 3,2 (2,4)	1,3 - 2,4 (2,1)	10,0 18,0 (13,0)
Vulcânicas intermediárias	1,0 - 2,7 (1,9)	1,2 - 3,6 (2,1)	4,0 - 17,0 (10,0)
Andesitos com K-baixos	0,8 - 1,5 (1,1)	1,2 - 1,5 (1,3)	4,0 - 6,0 (5,0)
Vulcânicas máficas	0,2 - 1,4 (0,7)	0,6 - 2,5 (1,6)	3,3 - 13,0 (7,9)
Vulcânicas ultramáficas	0,6	2,0	6,0
Sedimentares			
Folhelhos do Arqueano	0,8	1,2	3,0
Outros folhelhos	0,7 - 3,0 (1,5)	1,2 - 5,0 (2,3)	6,0 19,0 (13,0)
Arenitos	0,1 - 2,4 (1,3)	1,2 - 4,4 (2,1)	7,0 18,0 (11,0)
Carbonatos			

Modificado de Dickson & Scott (1997)

A comparação entre as tabelas 7 (radioelementos em rochas) e 8 (radioelementos em solos), permite algumas considerações. Os solos derivados de rochas granitóides, geralmente perdem cerca de 20% de seus radionuclídeos durante a pedogênese. Entretanto, estes resultados ocultam as grandes perdas devidas ao volume de mudanças ou trocas que acompanham o intemperismo. As perdas de potássio dos granitos é geralmente controlada pela alteração dos feldspatos potássicos. Muitas vezes o teor de potássio pode aumentar nos estágios iniciais do intemperismo, como resultado da remoção de minerais facilmente intemperizáveis, como os plagioclásios e minerais máficos. Por outro lado, grandes quantidades de fenocristais de feldspatos potássicos são relativamente resistentes ao intemperismo, podendo se concentrar nos solos residuais, favorecendo o enriquecimento de K. Contrariamente, sob condições de intemperismo laterítico, os granitóides podem ser caolinizados, resultando numa substancial perda de K, mas aparente retenção de 60-80% de U e Th.

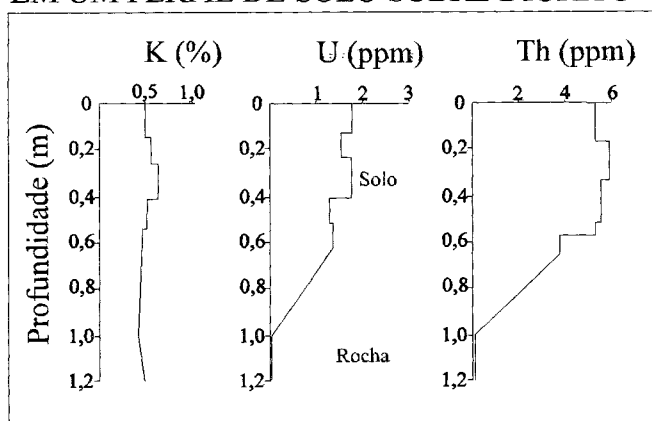
Os estudos de Dickson & Scott (1997) em zonas alteradas a partir de rochas intrusivas e extrusivas, intermediárias e básicas, mostraram variações significativas na interface saprolito-

solo. Tais mudanças refletem as perdas de K dos feldspatos potássicos e a retenção do U e do Th em óxidos de ferro e argilas ou em minerais resistentes. Em geral, os dioritos não são facilmente distinguíveis dos basaltos pois ambos mostram retenção de U e Th durante a pedogênese.

De acordo com Dickson & Scott (1997), os estudos de intemperismo em rochas intrusivas intermediárias revelam que não existem mudanças significativas nos teores de radioelementos até a pedogênese, mas geralmente indicam variações abruptas nas concentrações de U e Th na interface saprolito-solo. Este efeito está ilustrado na Figura 20, que mostra um perfil de solo sobre diorito na porção central de New South Wales (Austrália). Os dioritos apresentam um comportamento semelhante aos basaltos, os quais mostram um incremento de U e Th durante a pedogênese.

Tais solos, estudados pelos autores mencionados, são caracterizados pelo seu desenvolvimento *in situ*. Incrementos no U e no Th, na transição da rocha para o solo, são uma característica do intemperismo destas rochas, onde tais autores encontraram valores superiores ao dobro nos solos, em relação a rocha fresca. Tais mudanças refletem as perdas de feldspatos potássicos, retenção do U e do Th em óxidos de ferro e argilas ou em minerais resistentes. A identificação de intrusivas intermediárias em levantamentos aerogamaespectrométricos depende do grau de retenção de K nos solos, dos efeitos de solos transportados e dos teores de radioelementos das unidades adjacentes.

FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DE K, U E Th EM UM PERFIL DE SOLO SOBRE DIORITO

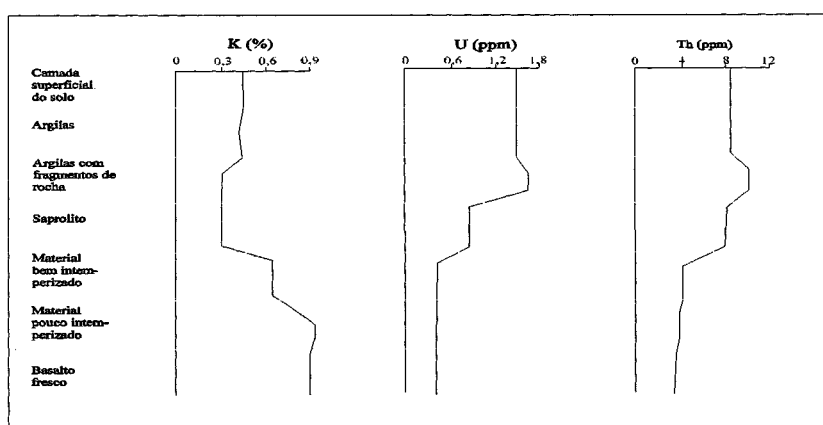


Modificado de Dickson & Scott (1997)

Citam também que os solos derivados de diques de diabásios frequentemente são contaminados por materiais adjacentes, como rochas ricas em radioelementos. Assim, um perfil completo poderia mostrar uma falsa mudança na interface solo-saprolito.

Dickson & Scott (1997), verificaram mudanças consideráveis em solos desenvolvidos sobre rochas vulcânicas máficas. Intemperismo de basaltos recentes no oeste da Austrália, produziram solos com perdas de K (50%) e ganhos de U e Th. Estes solos mostraram médias de U e Th muito próximas às provenientes das rochas félsicas. Tais mudanças refletiram as perdas de K do material vulcânico pelo intemperismo e a concentração de U e Th em óxidos de ferro durante a pedogênese. A variação dos teores de K, U e Th verificada durante o intemperismo dos basaltos é mostrada na Figura 21.

FIGURA 21 -VARIAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE K, U E Th DURANTE O INTEMPERISMO DO BASALTO



Modificado de Dickson & Scott (1997)

Observa-se que nas camadas superficiais do solo, os teores de U e Th são mais elevados do que nas porções menos intemperizadas e de rocha fresca. As concentrações de U e Th são ainda maiores na camada argilosa com fragmentos de rocha. O grande incremento de U e Th advindo do intemperismo de rochas vulcânicas máficas, certamente deve ser considerado na interpretação de levantamentos aerogamaespectrométricos. Derrames de basaltos em áreas com pouco desenvolvimento de solos, mostraram respostas gamaespectrométricas claramente opostas àquelas de rochas félsicas, ricas em radioelementos. Entretanto, nas áreas basálticas submetidas a um intemperismo intenso, a depleção de K e a concentração de U e Th conferiram respostas geofísicas dos solos com características similares àqueles provenientes do intemperismo de granitos. Os autores ressaltam que em áreas de basaltos com vários estágios de intemperismo, os diferentes derrames podem ser distinguidos pelas variações dos teores de K, U e Th.

4 RADIOATIVIDADE EM FERTILIZANTES

4.1 Introdução

A presença de radionuclídeos em fertilizantes derivados de rocha fosfática (Menzel, 1968; Guimond & Windhan, 1975; Pfister *et al.*, 1976; Spalding & Exner, 1976; Ring, 1977; Guimond, 1978; Rothbaum *et al.*, 1979; Paschoa *et al.*, 1984; Guimond & Hardin, 1989; Guzman, 1992; Mortvedt, 1992; Todorovsk *et al.*, 1993), leva a pensar sobre a redistribuição destes no meio ambiente pela atividade agrícola, bem como na possibilidade de aumentar a radiação gama natural emitida pelos solos. Assim, o presente capítulo visa investigar esta fonte radioativa utilizada na agricultura, uma vez que Latossolos (Latosolos Roxos), provenientes do intemperismo de rochas básicas, mostraram elevada radiação gama na área investigada e por muitos anos vêm recebendo volumes massivos de fertilizantes químicos no cultivo da cultura de cana-de-açúcar.

4.2 Radionuclídeos em Jazidas Fosfáticas

Segundo Ring (1977) a presença de radionuclídeos na rocha fosfática foi primeiramente notada em 1908, quando o físico inglês R. Strutt (Guimond, 1978) constatou que a radioatividade em amostras de fosforitas era muitas vezes maior do que a média encontrada nas demais rochas da crosta terrestre. Esta atividade é proveniente quase que exclusivamente do urânio e produtos do seu decaimento, os quais estão em equilíbrio radioativo, segundo Menzel (1968); Habash (1970 *apud* Ring 1977); Redeker (1971 *apud* Ring 1977).

A rocha fosfática contém radionuclídeos e outros contaminantes, os quais foram precipitados como minerais de fosfato de cálcio durante a sua deposição. O principal fenômeno envolvido é a substituição isomórfica. Na rocha fosfática, o íon U^{+4} é facilmente oxidado para U^{+6} por intemperismo e auto-oxidação durante o decaimento radioativo, de acordo com Altschuler (1973 *apud* Rothbaum 1978). A substituição isomórfica do cálcio pelo urânio tetravalente é explicada pela similaridade no tamanho do raio iônico (RI) dos elementos envolvidos, uma vez que o $RI_{U^{+4}} = 0,97$ Angstrons e o $RI_{Ca^{++}} = 0,99$ Angstrons (Guzman, 1992).

As variações nos teores de radionuclídeos em rochas fosfáticas foram pesquisadas por Menzel (1968), em amostras de jazidas distribuídas por várias regiões do mundo. Teores

médios de 59 ppm de U, 8 ppm de Th e 18 ppm de Ra foram relatados. A variação do teor de U nestas rochas foi de 3 a 400 ppm. Menzel (1968) cita que teores de radionuclídeos variam consideravelmente de acordo com o contexto geológico em que se enquadram as jazidas. Constatou que rochas fosfáticas de origem sedimentar da Flórida - USA (100 a 200 ppm de U) e norte da África (100 a 150 ppm de U), contém mais urânio do que as rochas sedimentares do Tenesse - USA (10 a 20 ppm de U) e rochas ígneas da Rússia (< 10 ppm de U). Guano das ilhas do Pacífico, mostraram teores de 20 a 100 ppm de U. Foi estimado que uma tonelada de rocha fosfórica da Flórida continha $3,7 \times 10^6$ Bq de U e Ra e $1,5 \times 10^5$ Bq de ^{232}Th . Guimond & Harding (1989) obtiveram concentrações médias de urânio, tório e ^{40}K representativas das principais jazidas de fosfato (Tabela 9).

TABELA 9 - ATIVIDADE (Bq/g) DE ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th E ^{40}K DE PRINCIPAIS JAZIDAS FOSFÁTICAS

Origem da rocha	% P_2O_5	^{226}Ra (Bq/g)	^{238}U (Bq/g)	^{232}Th (Bq/g)	^{40}K (Bq/g)	^{238}U (ppm)	^{232}Th (ppm)
Marrocos	34	1,6	1,7	0,01	0,02	138,21	2,46
Marrocos	35	1,6	1,7	0,02	0,01	138,21	4,91
Taiba-Togo (calcinado)	35	1,1	1,3	0,03	0,04	105,69	7,37
Bu Craa (oeste do Saara)	34	0,9	0,9	0,007	0,03	73,17	1,72
Kola (ex-URSS)	39	0,03	0,04	0,08	0,04	3,25	19,65
USA (Flórida)	32	1,6	1,5	0,02	-	121,95	4,91
USA (oeste)	31	1,0	1,0	-	0,02	81,30	-

Modificado de Guimond & Harding (1989)

Rochas fosfáticas provenientes de outras jazidas, também de importância econômica, apresentaram as seguintes concentrações de urânio (Deleon & Lazarevic, 19--): 105 - 149 ppm (Jordânia), 32 - 47 ppm (Tunísia), 110 - 132 ppm (Argélia) e 120 - 140 ppm (Israel).

No Brasil, a concentração média de U_3O_8 nas jazidas de fosfato em estratos sedimentares da região nordeste é cerca de 150 ppm (Saad, 1974). Situam-se entre os teores mais elevados de P_2O_5 e urânio do País. Dantas *et al.* (1984), citam uma estimativa nestas jazidas de 340 milhões de toneladas de fosforita, correspondentes a uma reserva de 44.000 toneladas de urânio, capaz de suprir oito centrais nucleoeletricas (1000 MWe cada), podendo ser equivalente a 530 milhões de toneladas de carvão ou 360 milhões de toneladas de petróleo.

Jazidas de origem ígnea, como Jacupiranga (SP), Araxá e Tapira (MG), também apresentam teores expressivos de urânio. Estas anomalias radioativas ocorrem na forma de pirocloro, ou de um complexo nióbio-tantalotitanato composto de terras raras com certas

concentrações de isótopos de rádio (Cullen & Paschoa, 1978). Nestas, significativas concentrações de U_3O_8 podem ser encontradas: 180 ppm em Tapira (Cullen & Paschoa, 1978); 30 ppm em Jacupiranga (SP) e Araxá (MG) (Lapido-Loureiro, 1986). Paschoa *et al.* (1986), verificaram concentrações médias de 150 ± 18 ppm de U em rochas de Araxá (MG) e estimaram em 15 ± 3 ppm deste elemento em rochas provenientes de Tapira (MG).

4.3 Radionuclídeos em Fertilizantes

A apatita contida nos concentrados fosfáticos é destruída pela ação do ácido sulfúrico durante a preparação dos superfosfatos. Entretanto o urânio permanece como sulfato de uranila $[(UO_2)SO_4]$ e sulfato uranoso $[U(SO_4)_2]$, ambos solúveis em água (Rothbaum *et al.*, 1979).

Teores de radionuclídeos foram determinados através de técnicas gamaespectrométricas em fertilizantes fosfáticos utilizados na antiga República Federal da Alemanha, em pesquisa sobre a contribuição de doses de radionuclídeos à população, por Pfister *et al.* (1976). A maioria dos fosfatos processados na Alemanha era importada de depósitos sedimentares do norte da África e da Flórida, os quais apresentavam teores apreciáveis de urânio e de produtos do seu decaimento. Estes depósitos, de origem marinha, foram formados no Terciário através de processos químicos, físicos e biológicos. A deposição do fosfato foi decorrente da erosão de rochas ígneas e transporte ao oceano. Contudo, algumas rochas processadas eram de origem ígnea e não continham teores significativos de urânio. Pfister *et al.* (1976) mostraram as atividades específicas dos radionuclídeos em rochas fosfáticas, em diferentes fontes de fertilizantes fosfatados, bem como em combinações de adubos contendo PK, NK e NPK.

Na Tabela 10 a atividade específica do U_{nat} em nCi/kg de P_2O_5 reflete a influência das diferentes origens de rochas fosfáticas usadas para a fabricação de fertilizantes. Observa-se que as atividades específicas de U e ^{226}Ra são maiores em jazidas sedimentares quando comparadas com atividades específicas destes radionuclídeos em jazidas de origem ígnea, como a de Kola (antiga URSS). Contudo, teores de tório mostraram-se bem maiores nesta, coincidindo assim com dados de Menzel (1968), que relata teores de Th em jazidas fosfáticas ígneas superiores aos encontrados em fontes fosfatadas sedimentares.

A Tabela 11 indica atividades baixas de urânio e altas de tório em produtos do processamento da apatita calcinada de Kola, como os fertilizantes Thomasphosphat e

Rhenania-phosphat. Observa-se atividades específicas de 24,9 nCi U/kg de fertilizante em marcas comerciais (Carolonphosphat), contrastando com valores menores que 1 nCi U/kg em fertilizantes provenientes das rochas ígneas. O tipo Hyperphosphat, um fertilizante obtido através de tratamentos leves na rocha, mostrou atividades específicas de U_{nat} e ^{226}Ra quase que equivalentes. O superfosfato simples, obtido pelo ataque sulfúrico na rocha, também não revelou muita diferença na atividade do urânio e do tório. Já o superfosfato triplo mostrou uma atividade de ^{226}Ra menor que a de U_{nat} , uma vez que o fertilizante é produzido pelo ataque de ácido fosfórico sobre a rocha (ou concentrado), com a eliminação do gesso. A elevada atividade do urânio pode ser explicada pelo processo de fabricação do ácido fosfórico, o qual envolve o ataque sulfúrico na rocha, onde o produto (H_3PO_4) retém o urânio desta sob a forma de um complexo uranil dissolvido, enquanto que o rádio, como um íon alcalino terroso, é precipitado e subsequente separação da solução juntamente com o gesso. Em decorrência, o produto final (superfosfato triplo) exibe uma diminuição específica da atividade do rádio e relativo aumento de U_{nat} , quando comparado com o superfosfato simples. A espécie Kalciphos, um fosfatodicalcico puro, obtido pela conversão da rocha fosfática com ácido nítrico, com subsequente precipitação e filtragem depois da adição de amônio, revela-se como um produto praticamente sem nenhum rádio. Durante a fabricação deste fertilizante, o urânio dissolvido na solução de ácido fosfórico se concentra no precipitado, enquanto o rádio permanece na solução com amônia.

Fertilizantes constituídos de P e K, resultantes de combinações de fontes fosfatadas com sais de potássio (KCl), revelaram atividades específicas de urânio e rádio semelhantes (Tabela 12). Considerável atenção deve ser dada à atividade específica do ^{40}K , pois observa-se que as fórmulas comerciais com P e K revelaram teores bem mais elevados de ^{40}K , quando comparada com fertilizantes constituídos somente de fonte fosfática (Tabela 11). Estes teores elevados são provavelmente oriundos do cloreto de potássio (KCl), adicionado ao fertilizante no fechamento da fórmula. Guimond (1978) cita que 4200 Ci de ^{40}K estavam presentes em 6 (seis) milhões de toneladas de potassa produzidas nos EUA em 1974, onde a atividade deste radionuclídeo era de 840 pCi/g de potássio.

Os produtos comerciais NP e NPK, na maioria dos fertilizantes mostrados nas tabelas 13 e 14, foram produzidos pela conversão de ácido nítrico na rocha, com subsequente neutralização com amônio e separação do nitrato de cálcio precipitado.

TABELA 10 - ATIVIDADE ESPECÍFICA EM ROCHAS FOSFÁTICAS

Rocha fosfática	P ₂ O ₅	Atividade nCi/kg de rocha				U _{nat}	Th _{nat}	Atividade nCi/kg			U _{nat}	Th _{nat}
	%					ppm	ppm	P ₂ O ₅			ppm	ppm
		U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}	⁴⁰ K			U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}		
Marrocos	34,0	45,0	41,9	0,4	0,6	69,14	3,64	132,3	123,1	1,1	203,28	10,0
Marrocos calcinado	35,0	47,1	42,7	0,5	0,3	72,37	4,54	134,6	122,0	1,4	206,82	12,73
Flórida-Pebble	34,0	35,2	34,4	0,8	1,3	54,09	7,27	103,5	101,2	2,4	159,03	21,82
Taiba-Togo	34,5	34,3	30,9	0,8	0,1	52,70	7,27	99,4	89,6	2,3	152,73	20,91
Bu-Craa	34,0	25,5	23,8	0,2	0,7	39,18	1,82	75,0	70,0	0,6	115,24	5,45
Kola	39,0	1,2	0,9	2,1	1,2	1,84	19,09	3,1	2,3	5,4	4,76	49,09

Modificado de Pfister *et al.* (1976)

TABELA 11 - ATIVIDADE ESPECÍFICA EM FERTILIZANTES FOSFATADOS

Nome comercial	P ₂ O ₅	Atividade nCi/kg de				U _{nat}	Th _{nat}	Atividade nCi/kg			U _{nat}	Th _{nat}
	%	fertilizante				ppm	ppm	P ₂ O ₅			ppm	ppm
		U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}	⁴⁰ K			U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}		
Superfosfato	18	14,0	14,1	0,4	3,7	21,51	3,64	77,7	78,1	2,4	119,39	21,82
Superfosfato triplo	38	21,7	6,3	1,2	1,4	33,34	10,91	57,1	16,6	3,2	87,74	29,09
Thomasphosphat	14-17	<1,0	0,2	0,1	<0,1	<1,54	0,91	-	1,0	0,3	-	2,73
Hyperphos	29	23,8	22,7	0,5	4,4	36,57	4,54	81,7	78,4	1,9	125,53	17,27
Novaphos	23	21,0	20,3	0,4	1,4	32,27	3,64	91,5	88,4	1,8	140,59	16,36
Carolonphosphat	26	24,9	15,5	0,8	1,3	38,26	7,27	95,7	59,7	3,1	147,05	28,18
Rhenania-Phosphat	28-30	<1,0	0,8	1,6	4,8	<1,54	14,54	-	2,7	5,5	-	50,0
Kalciphos	38-40	21,9	1,5	<0,1	0,3	33,65	<0,91	53,4	3,7	-	82,05	-

Modificado de Pfister *et al.* (1976)

TABELA 12 - ATIVIDADE ESPECÍFICA EM FERTILIZANTES PK

Fórmulas comerciais	P ₂ O ₅	Atividade nCi/kg de				U _{nat}	Th _{nat}	Atividade nCi/kg			U _{nat}	Th _{nat}
	%	fertilizante				ppm	ppm	P ₂ O ₅			ppm	ppm
		U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}	⁴⁰ K			U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}		
0-14-28 Phosphat Kali	14	16,2	15,2	0,2	208,7	24,89	1,82	115,9	108,6	1,5	178,08	13,64
0-10-20 Thomaskali	10	<1,0	0,1	<0,1	155,5	<1,54	<0,91	-	1,3	-	0,0	-
0-20-20 Hyperphos-Kali	20	13,7	15,1	0,5	140,2	21,05	4,54	68,6	75,5	2,3	105,41	20,91
0-15-25 Carolon-Kali	15	17,7	15,4	0,3	188,4	27,20	2,73	117,7	102,9	1,7	180,85	15,45
0-15-25 RHE-KA-PHOS	15	<1,0	0,9	0,9	182,7	<1,54	8,18	-	5,9	5,7	-	51,82
0-16-16 CEDERAN	16	14,4	16,1	0,3	110,0	22,13	2,73	89,8	100,6	1,8	137,98	16,36
ENPEKA Phosphatkali	20	24,5	8,4	0,3	233,7	37,64	2,73	122,4	42,1	1,4	188,07	12,73

Modificado de Pfister *et al.* (1976)

TABELA 13 - ATIVIDADE ESPECÍFICA EM FERTILIZANTES NP

Fórmulas comerciais	P ₂ O ₅	Atividade nCi/kg de				U _{nat}	Th _{nat}	Atividade nCi/kg			U _{nat}	Th _{nat}
	%	fertilizante				ppm	ppm	P ₂ O ₅			ppm	ppm
		U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}	⁴⁰ K			U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}		
Complezal “Typ NP” 20-20-0	20	20,1	13,6	0,3	1,0	30,88	2,73	100,5	68,1	1,7	154,42	15,45
Diammonphosphat	46	58,3	0,5	0,5	1,8	89,58	4,54	126,7	1,0	1,1	194,68	10,0
ENPEKA Ammonphosphat 11-52-0	52	62,1	2,4	1,3	<0,1	95,42	11,82	119,5	4,6	2,5	183,62	22,73
ENPEKA-Stickstoff-phosphat 20-20-0	20	25,6	12,2	0,3	1,6	39,33	2,73	127,9	60,8	1,7	196,52	15,45
Kampka-NP 20-20-0	20	7,5	1,4	0,8	1,1	11,52	7,27	37,6	7,1	3,9	57,77	35,45
NITROPHOS	20	21,8	14,0	0,8	1,2	33,50	7,27	108,9	70,1	4,1	167,33	37,27
RUSTICA 20-20-0	20	<0,1	0,2	0,8	<0,1	<1,54	7,27	-	1,2	4,2	-	38,18

Modificado de Pfister *et al.* (1976)

TABELA 14 - ATIVIDADE ESPECÍFICA EM FERTILIZANTES NPK

Fórmulas comerciais	P ₂ O ₅	Atividade nCi/kg de				U _{nat}	Th _{nat}	Atividade nCi/kg			U _{nat}	Th _{nat}
	%	fertilizante				ppm	ppm	P ₂ O ₅			ppm	ppm
		U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}	⁴⁰ K			U _{nat}	²²⁶ Ra	Th _{nat}		
Complezal “Typ Gelb” 15-15-15	15	14,5	9,3	0,3	105,7	22,28	2,72	109,6	72,0	1,9	168,40	17,27
ENPEKA 12-12-12-17	12	18,0	7,9	0,1	130,2	27,66	0,91	149,9	65,6	1,2	230,33	10,91
KAMPKA 13-13-21	13	6,8	1,5	0,6	154,1	10,45	5,45	52,2	11,5	4,8	80,21	43,64
Neues AmSumpKa	12	17,1	13,5	0,2	113,2	26,27	1,82	142,2	112,3	1,4	218,50	12,73
NITROPHOSKA 10-15-20	15	16,8	7,1	0,5	145,3	25,81	4,54	111,7	47,1	3,1	171,63	28,18
RUSTICA 13-13-21	13	<1,0	0,2	1,2	147,7	<1,54	10,91	-	1,9	8,9	-	80,91
Stodiek-Dünger NPK 6-10-18-2	10	10,4	7,7	0,3	140,3	15,98	2,73	104,1	76,5	3,2	159,95	29,09

Modificado de Pfister *et al.* (1976)

O rádio, sendo parcialmente removido juntamente com o nitrato de cálcio, conferiu uma baixa atividade deste radionuclídeo quando comparada com o urânio dos fertilizantes NP e NPK. Entretanto, tipos comerciais como o Diammonphosphat (fosfatodiamônio ou DAP) e ENPEKA-Ammonphosphat (11-52-0), que são produzidos pela reação do ácido fosfórico, revelaram atividade de urânio superior à de rádio. O tipo do fosfato e o processamento químico envolvidos, podem também afetar o teor de tório nos fertilizantes. Fertilizantes obtidos da apatita de Kola (como as espécies Rhenania-Phosphat e a RUSTICA), apresentaram teores significativamente mais elevados de tório. Procedimentos químicos que removem o rádio, podem influenciar a atividade alfa e radiação gama emitida de produtos ou filhos do decaimento radioativo do tório, pois tanto o ^{232}Th como o ^{228}Th são seguidos por um isótopo de rádio (^{228}Ra e ^{224}Ra , respectivamente) durante o decaimento. Depois da separação química no curso de produção do fertilizante, o ^{228}Ra e seus filhos de curta meia-vida, como o ^{228}Ac , não atingem o equilíbrio radioativo com o seu pai (^{232}Th), nas amostras investigadas, devido a longa meia-vida do ^{228}Ra (6,7 anos), ao passo que descendentes de vida curta do ^{224}Ra , ^{212}Bi , ^{208}Tl e o próprio ^{224}Ra (3,64 dias) estarão novamente em equilíbrio radioativo com seu pai comum, o ^{228}Th , em poucas semanas. Conseqüentemente, a avaliação do espectro da radiação gama resultou em maiores atividades de ^{212}Bi e ^{208}Tl , os quais equivalem àquela do ^{228}Th , do que as do ^{228}Ac que correspondem à do ^{232}Th . Estes efeitos foram principalmente observados em amostras de superfosfato triplo, fosfato diamônio e RUSTICA, por Pfister *et al.* (1976).

Os resultados de Pfister *et al.* (1976), mostraram que os radionuclídeos contidos em fertilizantes fosfatados contribuem muito pouco com a exposição do homem à radiação, considerando uma completa retenção do rádio depositado no solo, com os fertilizantes fosfatados, durante um período de 80 (oitenta) anos. Medidas de atividade específica nestes solos extensivamente fertilizados por várias décadas, confirmaram esta hipótese. Apesar da permanência do rádio no solo por muitos anos, o urânio não se acumulou nas mesmas proporções devido a perdas por lixiviação.

Guimond (1978) mostra a concentração da radioatividade média de fertilizantes oriundos de jazidas sedimentares da Flórida (Tabela 15).

TABELA 15 - RADIOATIVIDADE NATURAL EM FERTILIZANTES PROVENIENTES DE FOSFATOS DA FLÓRIDA

Material	^{226}Ra (pCi/g)	^{238}U (pCi/g)	^{238}U (ppm)	^{230}Th (pCi/g)	^{232}Th (pCi/g)	^{232}Th (ppm)
Superfosfato simples	21,3	20,1	60,46	18,9	0,6	5,45
DAP	5,6	63	189,81	65	0,4	3,64
Concentrado fosfático	21	58	174,47	48	1,3	11,82
MAP	5	55	165,45	50	1,7	15,45
Ácido fosfórico (28%)	1	25,3	76,10	28,3	3,1	28,18
Gypsum	33	6	18,05	13	0,3	2,73

Modificado de Guimond (1978)

As diferenças na concentração da radioatividade de vários produtos, são principalmente função do fracionamento durante a reação química na fase de acidulação da produção de ácido fosfórico. Produtos como o MAP (fosfato diamônio), apresentaram concentrações de rádio dez vezes menores que a de urânio, uma vez que o processo de fabricação deste fertilizante utiliza somente amônia com ácido fosfórico, sem nenhuma reação direta com a rocha. Conseqüentemente, a radioatividade introduzida na reação vem do ácido fosfórico, o qual é rico em urânio e deficiente em ^{226}Ra . Os concentrados superfosfáticos mostraram conter quatro vezes mais rádio que o MAP e aproximadamente a mesma concentração de urânio, devido ao concentrado superfosfático ser produzido pela acidulação da rocha fosfática pelo ácido fosfórico. Contudo, em resultados anteriormente citados (Pfister *et al.*, 1976), teores de ^{226}Ra em superfosfatos triplos ou concentrados superfosfáticos foram menores do que nos superfosfatos simples. Já Guimond (1978) mostra que os teores de ^{226}Ra são equivalentes tanto para superfosfatos simples quanto para os superfosfatos triplos. Em se tratando de combinações NPK, o autor menciona a importância de se conhecer a origem do fósforo (se é proveniente de um superfosfato triplo, ou de um superfosfato simples, ou de um MAP, etc.) no fertilizante, quando se pretende avaliar a sua radioatividade e determinar os teores de radionuclídeos.

As atividades específicas estimadas de alguns fertilizantes produzidos nos EUA, no ano de 1974, são mostradas na Tabela 16.

TABELA 16 - RADIOATIVIDADE ESTIMADA PRESENTE EM FERTILIZANTES FOSFATADOS PRODUZIDOS NOS EUA DURANTE 1974

Material	Quantidade Mton		^{226}Ra (Ci)	^{238}U (Ci)	^{230}Th (Ci)	^{232}Th (Ci)
	$\times 10^6$	$\times 10^6 \text{ P}_2\text{O}_5$				
Fertil. doméstico	25,6	8,0	1075	1050	1083	11
Super simples	3,1	0,6	66	63	56	2
Concentrado superfosfático	3,4	1,6	69	190	160	1
Fosfato de amônio	5,3	2,4	30	330	340	2
Ácido fosfórico*	10,0	3,1	10	253	283	31
Gypsum	25,2	-	833	153	327	7

Modificado de Guimond (1978)

* Não inclui ácido fosfórico usado para produzir DAP e SST

O ^{226}Ra mostrou valores de 833 Ci no gesso o qual é geralmente armazenado nas próprias fábricas de fertilizantes. O superfosfato simples e o concentrado fosfático foram os que apresentaram maior atividade de ^{226}Ra , depois do gesso. A maioria do U estava no fosfato de amônio e no ácido fosfórico, embora as concentrações no superfosfato simples e no superfosfato triplo mostrassem apreciáveis atividades destes radionuclídeos. Guimond (1978) relaciona as concentrações de radionuclídeos e o consumo de fertilizantes em 10 (dez) estados norte-americanos. Como resultado da alta aplicação de fertilizantes fosfatados, aproximadamente 86 Ci de ^{226}Ra , 610 Ci de ^{238}U e 630 Ci de ^{230}Th foram redistribuídos nestes estados.

Aplicações de superfosfato simples e ácido fosfórico resultaram em grandes adições de ^{226}Ra e ^{238}U , respectivamente. Numa camada de 10 cm de solo, uma taxa de aplicação de 280,2 kg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ para cada um destes dois fertilizantes, resultaria na adição de 0,02 pCi $^{226}\text{Ra}/\text{g}$ e 0,03 pCi $^{238}\text{U}/\text{g}$ de solo, respectivamente. Urânio, rádio e tório estão fortemente adsorvidos no solo, como o fosfato, segundo Shultz (1965 *apud* Guimond 1978). Contudo, as perdas destes radionuclídeos podem ocorrer principalmente por erosão dos sedimentos, sendo similares às perdas do fosfato. Desta forma, tais perdas podem ser de 0 até 60% durante vários anos, de acordo com Pierre *et al.* (1953 *apud* Guimond 1978) e Miller (1976 *apud* Guimond 1978).

Guzman (1992), utilizou diferentes técnicas para determinar urânio em matrizes fosfatadas. Quantidades relativamente altas de urânio (tabelas 17 e 18) foram encontradas nas

seguintes amostras: rocha fosfática bruta (29% P_2O_5), proveniente de jazidas do Estado de Baja Califórnia Sur (México); rocha fosfática concentrada (33% de P_2O_5), proveniente da mesma jazida; fertilizante superfosfato triplo granular (46% de P_2O_5); fertilizante com 17% de P_2O_5 ; fertilizante com 20% de P_2O_5 (superfosfato simples com variação de 14 a 21% de P_2O_5); fertilizante com 46% de P_2O_5 (superfosfato triplo 44 - 48% de P_2O_5) e fosfato diamônio (46% de P_2O_5).

Guzman (1992), para identificar a presença de alguns radioelementos de interesse nas amostras em estado natural, fez medições por meio de detector de germânio hiperpuro. Obteve picos correspondentes às seguintes energias: 143 KeV; 186 KeV; 243 KeV; 296 KeV; 353 KeV; 610,68 KeV e 769,5 KeV. A primeira delas corresponde ao ^{235}U , a segunda a atividade total do ^{226}Ra e do ^{235}U ; as três seguintes ao ^{214}Pb e as restantes ao ^{214}Bi , as quais são descendentes radiogênicos do urânio. O pico de energia correspondente a 1462 KeV, foi atribuído ao ^{40}K presente na amostra do fertilizante com 17% de P_2O_5 . Cabe ressaltar que estes picos de energia, não correspondem às janelas utilizadas em levantamentos aerogamaespectrométricos, mostradas no Capítulo 2.

TABELA 17 - CONCENTRAÇÕES DE URÂNIO DETERMINADAS POR ANÁLISE DE ATIVAÇÃO NEUTRÔNICA (AAN).

Amostra	Urânio (ppm)
Rocha fosfática bruta	75,56 ± 2,97
Rocha fosfática concentrada	121,08 ± 5,86
Rocha fosfática de alimentação do ácido	128,0 ± 12,48
Rocha fosfática de alimentação do superfosfato triplo	130,00 ± 8,58
Ácido fosfórico	119,81 ± 10,90
Fertilizante com 17% de P ₂ O ₅	90,58 ± 12,4
Fertilizante com 20% de P ₂ O ₅	90,28 ± 0,83
Fertilizante com 46% de P ₂ O ₅	197,40 ± 12,31
Fosfato diamônio	188,43 ± 3,62
Superfosfato triplo granular	196,32 ± 2,53
Fosfogesso	4,85 ± 1,72

Modificado de Guzman (1992)

TABELA 18 - CONCENTRAÇÕES DE URÂNIO DETERMINADAS POR ESPECTROFOTOMETRIA UV/VISÍVEL

Amostra	Urânio (ppm)
Rocha fosfática bruta	72,40 ± 5,48
Rocha fosfática concentrada	126,77 ± 3,86
Rocha fosfática de alimentação do ácido	103,80 ± 10,72
Rocha fosfática de alimentação do superfosfato triplo	108,40 ± 8,07
Ácido fosfórico	127,06 ± 3,92
Fertilizante com 17% de P ₂ O ₅	75,00 ± 9,54
Fertilizante com 20% de P ₂ O ₅	80,00 ± 4,30
Fertilizante com 46% de P ₂ O ₅	176,60 ± 7,09
Fosfato diamônio	170,35 ± 8,92
Superfosfato triplo granular	178,60 ± 5,31
Fosfogesso	6,72 ± 1,22

Modificado de Guzman (1992)

Através da análise de ativação neutrônica (AAN), a qual define-se como um método baseado na produção e detecção da radioatividade induzida em elementos químicos mediante o bombardeio com nêutrons, resultando em produtos radioativos específicos das amostras, Guzman (1992) revela que tanto rochas fosfáticas como seus derivados (fertilizantes) continham concentrações de urânio relativamente altas (75 - 200 ppm), como mostrado na Tabela 17.

A citada autora concluiu que a quantidade de urânio contida nos fertilizantes fosfatados varia em função do processo de produção e da origem da rocha. A quantidade de urânio nos fertilizantes mostrou-se bem mais alta do que nas rochas e sua concentração é dependente do teor de fósforo. A determinação de urânio mediante espectrofotometria UV/Visível também foi realizada. Os resultados mostraram que os teores de urânio, do mesmo modo, estavam entre 70 - 200 ppm, como mostrado na Tabela 18.

Os teores de urânio em alguns materiais considerados potencialmente poluidores, como os fertilizantes fosfatados utilizados na Bulgária, foram estudados por Todorovsk *et al.*(1993). A determinação dos teores foi realizada através de AAN em amostras de rochas obtidas mensalmente de jazidas do norte da África (Tunísia), bem como de produtos de seus processamentos, como o ácido fosfórico, o superfosfato e o fosfogesso (Tabela 19).

TABELA 19 - TEORES DE URÂNIO EM FOSFORITAS E PRODUTOS DE SEU PROCESSAMENTO EM FÁBRICAS DE FERTILIZANTES DA BULGÁRIA

Produto	Urânio em ppm
Fosforitas da Tunísia	$33,0 \pm 1,7$
Fosforitas da Tunísia	$54,0 \pm 2,2$
Ácido ortofosfórico (80%)	$20,0 \pm 1,0$
Ácido ortofosfórico (80%)	$70,0 \pm 4,0$
Superfosfato (48%)	$40,0 \pm 2,0$
Fosfogesso	$3,0 \pm 0,2$

Modificado de Todorovsk *et al.*(1993).

No Brasil, trabalhos voltados à recuperação de urânio em fontes fosfatadas, contribuíram para determinar as concentrações de U em fertilizantes nacionais.

Paschoa *et al.* (1984), através do registro de traços de fissão, baseado em detector de traço nuclear de estado sólido (SSNTD), determinou a concentração de U em apatita e em concentrados e fertilizantes fosfáticos, de jazidas brasileiras de origem ígnea.

Amostras de rocha fosfática, concentrados fosfáticos antes da filtração, concentrados de apatita fina e grosseira, fertilizantes parcialmente solúveis, superfosfatos simples (SSP), monoamônio de fósforo (MAP) e fosfato diamônio (DAP), passaram por tratamentos prévios e adequados para se iniciar a análise de U pelo método SSNTD.

Os resíduos filtrados alcançaram massas de U de 0,15 µg (SSP) a 22 µg (concentrado fosfático), com concentrações entre 0,3 ppm (SSP) e 4,5 ppm de U (concentrados fosfáticos). Foram preparadas soluções-padrão de nitrato de uranila com concentrações de U conhecidas de 1000 e 100 ppm, por diluição volumétrica, para se obter uma curva de calibração depois da irradiação com SSNTD. Os procedimentos de irradiação estão descritos em Paschoa *et al.* (1982). As concentrações de urânio nos concentrados e fertilizantes são mostradas na Tabela 20.

TABELA 20 - CONCENTRAÇÕES DE URÂNIO EM CONCENTRADOS FOSFÁTICOS E FERTILIZANTES BRASILEIROS

Origem	Tipo de amostra	Nº amostras	Urânio (ppm)	Média (ppm)
Araxá	Concentrado	3	200 - 218	212 ± 22
Tapira	Concentrado	3	20 - 22	21 ± 3
Araxá	FAC	3	199 - 218	209 ± 21
Araxá	CAC	3	107 - 113	110 ± 13
Araxá	FAPS	3	86 - 91	88 ± 8
Araxá	SSP	8	86 - 101	94 ± 10
Tapira	SSP	4	23 - 36	24 ± 3
Araxá	SST	5	88 - 109	100 ± 8
Tapira	SST	4	28 - 32	30 ± 3
Tapira	MAP	5	10 - 12	11 ± 2
Tapira	DAP	5	32 - 38	35 ± 5

Modificado de Paschoa *et al.* (1984)

Na Tabela 20, verifica-se que os concentrados fosfáticos de Araxá revelaram concentrações de urânio dez vezes maiores do que os de Tapira. Os teores de U foram ligeiramente mais altos nos superfosfatos triplos do que nos superfosfatos simples, tanto em

Tapira quanto em Araxá. Estes resultados se adequam com os dados publicados por Guimond (1978) e outros autores como Ryan & Cotter (1980 *apud* Paschoa *et al.* 1984) e Guimond & Windhan (1975 *apud* Paschoa *et al.* 1984). Os fertilizantes de Tapira (SSP e SST) mostraram concentrações médias de U de 24 ± 3 e 30 ± 3 ppm, respectivamente. Estes valores, superiores ao valor médio encontrado na rocha fosfática que lhes deu origem, foram atribuídos ao aparente enriquecimento de urânio causado pela introdução de H_3PO_4 e H_2SO_4 durante o processo de fabricação do fertilizante. Os autores citam que a origem destes ácidos não era conhecida, mas que provavelmente as concentrações de U (21 ppm) eram maiores que as dos concentrados fosfáticos de Tapira, ressaltando que assim como 200 ppm de U em ácido fosfórico foram encontrados por Guimond (1978), resultados preliminares indicaram 250 ppm de U em H_3PO_4 usados pela indústria brasileira de fertilizantes (Paschoa *et al.*, 1984). Provavelmente também o H_3PO_4 conferiu o aumento nos teores de U em MAP e DAP produzidos com a apatita de Tapira. Em adição, a concentração de U no DAP mostrou-se superior ao do MAP, concordando com os dados de Guimond (1978) e Guimond e Windham (1975 *apud* Paschoa *et al.* 1984) em fertilizantes da Flórida.

4.4 Contribuição dos Radionuclídeos de Fertilizantes ao Meio Ambiente

Acumulações de urânio em solos pelo uso intensivo e continuado de fertilizantes fosfatados, foram estudados por Rothbaum *et al.* (1979). Os experimentos localizados em Rothamsted (Inglaterra) e Nova Zelândia se caracterizavam por receber fertilizantes fosfatados de diferentes origens. Os solos ingleses, entre os anos de 1840 a 1888, recebiam superfosfatos produzidos com ataque de H_2SO_4 e restos de calcinação, os quais continham poucas quantidades de urânio. A partir de 1889, superfosfatos comerciais oriundos do norte africano foram usados nestas áreas. Análises destes fertilizantes amostrados nos anos de 1925, 1929, 1946 e 1967, indicaram um teor médio de 34 g U/ton. Nos experimentos da Nova Zelândia, uma média de 42 g U/ton foi verificada nos fertilizantes produzidos de rochas provenientes de Nauru e das ilhas Christmas.

A Tabela 21 mostra os teores de P e U na superfície dos solos (0 - 23 cm) em 3 (três) experimentos de Rothamsted, com e sem aplicação de fosfatos. Observa-se que em todos os experimentos, os teores de U se elevaram no ano de 1976 quando comparados com o primeiro ano de amostragem nos solos onde fontes fosfáticas eram aplicadas anualmente. As médias dos teores de U nesta situação confirmam este incremento. Os teores de fósforo total

(P) no solo também se elevaram pelas aplicações de fertilizantes. Porém, concentrações significativas de P em solos de Barnfield, nos anos de 1843 e 1852, não foram utilizadas para cálculo da média porque receberam fertilizantes fosfáticos de origem orgânica (restos de ossos - *bone phosphates*).

TABELA 21 - URÂNIO E FÓSFORO EM AMOSTRAS DE SOLOS (0 - 23 cm) DE TRÊS EXPERIMENTOS DE ROTHAMSTED (INGLATERRA)

Experimento e ano inicial	Ano amostrado	Urânio (ppm)		Fósforo (ppm)	
		P não aplicado	P aplicado anualmente	P não aplicado	P aplicado anualmente
Broadbalk (BK)	1881	2,43	2,25	550	800
1843	1944	2,33	2,54	610	1040
	1976	2,43	2,71	540	1110
Barnfield (BN)	1870	2,49	2,47	530	650
1843	1958	2,45	2,80	790	1180
	1976	2,42	2,81	810	1140
ParK Grass	1876	2,37	2,53	630	750
(PG) 1856	1959	2,52	2,96	520	1390
	1976	2,48	3,11	470	1400
Média	1870 - 1880	2,43	2,42	590	730
	1940 - 1950	2,43	2,77	560	1200
	1976	2,44	2,88	505	1220

Modificado de Rothbaum *et al.* (1979)

Os teores médios de U no subsolo (23 - 46 cm) não evidenciaram um enriquecimento de urânio, como mostrados na Tabela 22.

TABELA 22 - URÂNIO (ppm) NO SUBSOLO DE TRÊS EXPERIMENTOS DE ROTHAMSTED (INGLATERRA)

Amostragem	P não aplicado				P aplicado anualmente			
	BK	BN	PG	Média	BK	BN	PG	Média
1870 - 1880	2,36	2,34	2,61	2,44	2,16	2,36	2,61	2,38
1940 - 1950	2,36	2,15	2,56	2,36	2,25	2,25	2,65	2,38
1976	2,27	2,08	2,61	2,32	2,04	2,17	2,61	2,27
Média	2,33	2,19	2,59	2,37	2,15	2,26	2,62	2,34

Modificado de Rothbaum *et al.* (1979)

Resultados do incremento de U nos solos (camada de 0-23 cm) de Rothamsted revelaram teores de 574 g U/ha em 1944 contrastando com teores de 1062 g U/ha no ano de 1976, portanto quase o dobro. Os valores médios gerais das décadas de 40 - 50, revelaram índices de 924 g U/ha e no ano de 1976 valores gerais de 1229 g U/ha.

Mortvedt (1992), discutindo resultados de pesquisas de diferentes autores, afirma que a acumulação de radionuclídeos em solos é produto da concentração deles em fertilizantes fosfatados, da taxa e do número de aplicações do adubo. Contudo, propriedades do solo como pH, textura, teores de cálcio e de matéria orgânica, exercem influências sobre a disponibilidade de U, Ra e Th. Assim, reações no solo que influenciam a retenção e a disponibilidade, afetarão diretamente a biodisponibilidade destes radionuclídeos.

Teores de urânio, de matéria orgânica e de fósforo foram analisados a cada 7,5 cm da camada do solo (45 cm), em áreas fertilizadas há 85 anos, com superfosfatos, por Rothbaum *et al.* (1979). A Tabela 23 mostra estes resultados. As concentrações de urânio são mais elevadas na superfície do horizonte do que em maiores profundidades e diminui mais rapidamente do que o P. Diferentemente de P pouco urânio move-se por transporte ou lixiviação nestes solos, sob gramíneas. A citada tabela mostra que não houve incremento nos teores de U, com o aumento da profundidade.

TABELA 23 - TOTAL DE URÂNIO (ppm), FÓSFORO (ppm) E CARBONO (%), A VÁRIAS PROFUNDIDADES DO SOLO DE PARK GRASS, ROTHAMSTED NO ANO DE 1976

Ano	Profundidade (cm)	Sem aplicação de superfosfato			Superfosfato aplicado anualmente (33 kg P/ha)			Incremento devido ao superfosfato	
		U	P	C	U	P	C	U	P
1976	0,0 - 7,5	2,42	510	4,8	3,69	1790	4,3	1,27	1280
	7,5 - 15,0	2,56	460	3,1	3,08	1440	3,1	0,52	980
	15 - 22,5	2,45	440	2,1	2,74	1080	2,3	0,29	640
	22,5 - 30	2,62	390	1,4	2,72	800	2,1	0,10	410
	30 - 37,5	2,67	340	1,0	2,65	510	1,2	-0,02	170
	37,5 - 45	2,56	290	0,6	2,53	300	0,6	-0,03	10

Modificado de Rothbaum *et al.* (1979)

Duas amostras de solo (0 - 22,5 cm), coletadas no ano de 1975, foram separadas em frações pesadas e leves, usando uma mistura de bromofórmio/etanol de peso específico de 2,2 g/cm³ e analisadas para urânio, fósforo e carbono (Tabela 24). Nos solos sem adição de P, a fração leve continha menos urânio do que a fração pesada (baixo teor de matéria orgânica). Entretanto, a fertilização com superfosfato por 85 (oitenta e cinco) anos, aumentou em quatro vezes a concentração de U na fração leve em relação a fração pesada, ou seja, um incremento de 2,48 ppm e 0,62 ppm, respectivamente.

TABELA 24 - TEORES DE URÂNIO (ppm), FÓSFORO (ppm) E CARBONO (%) DAS FRAÇÕES LEVE E PESADA DO SOLO DE PARKGRASS, ROTHAMSTED, COLETADAS NO ANO DE 1975

Ano	Prof. (cm)	Sem aplicação de superfosfato			Superfosfato aplicado anualmente (33 kg P/ha)			Incremento devido ao superfosfato	
		U	P	C	U	P	C	U	P
1975	0 - 22,5								
	Fração leve	2,03	450	15,3	4,51	1200	20,1	2,48	750
	Fração pesada	2,9	330	3,3	3,52	1610	2,4	0,62	1280

Modificado de Rothbaum *et al.* (1979)

Rothbaum *et al.* (1979), também analisaram solos fertilizados da Nova Zelândia desde o ano de 1954. Estimaram que 330 g U /t foram introduzidos nas camadas superficiais. Análises de solos de pastagens (Tabela 25), confirmaram que o urânio de superfosfato feito de guano, acumulou-se preferencialmente nos primeiros 5 (cinco) cm do solo. O aparente incremento de urânio dos superfosfatos nos 15 cm iniciais de profundidade (~350 g U/t) foi confirmado pela estimativa da quantidade aplicada (330 g U/t) entre 1954 e 1974.

TABELA 25 - TOTAL DE URÂNIO FÓSFORO E DENSIDADE A TRÊS PROFUNDIDADES DE SOLOS DA NOVA ZELÂNDIA

Horizonte do solo amostrado	Densidade volumétrica	Nenhum superfosfato aplicado		Superfosfato aplicado anualmente (37 kg P/ha)	
		U (ppm)	P (ppm)	U (ppm)	P (ppm)
(cm)	(g/cm ³)				
0 - 5	0,71	2,23	1440	2,68	1780
5 - 10	0,94	2,30	1320	2,50	1450
10 - 15	1,00	2,28	1190	2,48	1250

Modificado de Rothbaum *et al.* (1979)

Os resultados de Rothbaum *et al.* (1979) mostraram que todo o urânio contido no superfosfato aplicado, permaneceu na superfície dos solos de Rothamsted e Nova Zelândia. Estes resultados foram compatíveis com dados de Spalding & Sackett (1972 *apud* Rothbaum *et al.* 1979), os quais encontraram significativos teores de U no leito dos rios de áreas intensivamente fertilizadas no sudoeste dos Estados Unidos. Rothbaum *et al.* (1979) citam que os elevados teores observados por estes autores foram devidos a perdas por lixiviação ou erosão dos solos. Na ausência de matéria orgânica, o urânio geralmente é móvel e transportado como um complexo de carbonato hexavalente (Hostetler 1965 *apud* Rothbaum *et al.* 1979) ou como um íon uranila divalente (Shulz 1965 *apud* Rothbaum *et al.* 1979). Concentrações de urânio foram relacionadas com teores de matéria orgânica (Talibudeen 1964 *apud* Rothbaum *et al.* 1979) e o mesmo pode ser adsorvido por ácidos húmicos (Szalay 1964 *apud* Rothbaum *et al.* 1979). O urânio, portanto, pode ser removido de solos arenosos contendo baixos teores de matéria orgânica e provavelmente apresentar mobilidade similar à do fósforo (Rothbaum *et al.*, 1979).

Mortvedt (1992), cita resultados analíticos de ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra e ^{228}Th em amostras de fertilizantes NPK utilizados na Finlândia (Tabela 26). Estes fertilizantes representam 28 (vinte e oito) formulações usadas na agricultura, florestas e jardins, com uma média de N, P e K de 16,5; 6,2 e 11,3, respectivamente. Verifica-se que a média das atividades dos radionuclídeos por unidade de peso produzido de P, variaram com as fábricas. A concentração média dos radionuclídeos foi calculada a partir da quantidade relativa de fertilizante produzido por cada fábrica. As taxas de radionuclídeos foram então estimadas com base numa aplicação anual de 30 kg de P por hectare. Estimou-se, assim, que uma contribuição anual de ^{238}U dos fertilizantes representava 0,25% do total do urânio de ocorrência natural na camada superficial do solo de 10 (dez) cm. Considerando que as aplicações de fósforo, eventualmente, atingiam maiores profundidades do solo (provavelmente 25 cm), a contribuição anual de U poderia ser menor do que aquela percentagem. Este trabalho (Mustonen, 1985), referenciado por Mortvedt (1992), não foi relacionado aos teores de matéria orgânica do solo.

TABELA 26 - ATIVIDADE MÉDIA DOS RADIONUCLÍDEOS POR UNIDADE DE PESO DE P EM MISTURAS DE FERTILIZANTES NPK DE VÁRIAS FÁBRICAS DA FINLÂNDIA

Fábrica	^{238}U	^{238}U	^{235}U	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th
	(ppm)*	----- (Radioatividade, Bq/kg) -----				
I	235,77	2900	160	830	87	210
II	79,67	980	42	290	59	140
III	195,13	2400	130	770	95	220
IV	601,63	7400	420	1500	62	200
V	333,33	4100	230	2000	100	160
Peso médio*	308,94	3800	210	1100	78	190

Modificado de Mustonen (1985 *apud* Mortvedt 1992)

* Valor médio referente a quantidade relativa de fertilizante produzido por cada fábrica

Acumulações de tório e teores de matéria orgânica foram estudados por Hansen & Huntington (1969 *apud* Mortvedt 1992). Encontraram diferentes acumulações de tório nos horizontes imediatamente abaixo das camadas com alto teor de matéria orgânica. A matéria orgânica, aparentemente fortemente complexada com o Th tetravalente, aumentava a mobilidade deste radionuclídeo no solo. Os autores registraram também que a distribuição do rádio era mais regular que a do tório, refletindo assim os efeitos da química do solo com relação ao ^{230}Th e ao ^{226}Ra . A matéria orgânica dos solos conferiu a retenção de U e a mobilização de Th.

O efeito da textura no movimento dos radionuclídeos é semelhante ao dos cátions divalentes, como o Ca^{++} e o Mg^{++} (Mortvedt, 1992). Cátions divalentes são adsorvidos pelas argilas do solo pelo mecanismo de troca catiônica. Assim, a taxa relativa de adsorção cresce com o teor de argila do solo, devido a mobilidade dos radionuclídeos se comportar inversamente a adsorção. Moffet & Teller (1977 *apud* Mortvedt 1992), registraram concentrações mais elevadas de produtos do decaimento do urânio (^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po) em solos argilosos, do que nas frações arenosas em áreas de jazidas de urânio.

Concentrações de ^{226}Ra em vegetais desenvolvidos em diferentes frações de areia e argila fosfática, foram obtidas por Carrier e Million (1989 *apud* Mortvedt 1992). Segundo tais autores, as concentrações de ^{226}Ra , em tecidos de plantas, variaram entre as espécies vegetais e em função da resposta relativa da cultura em relação a textura do solo. Assim, condições de solo que proporcionassem um maior desenvolvimento à planta, exerceriam um

efeito de diluição do ^{226}Ra nos tecidos. Contudo, nem todos os resultados de ^{226}Ra podem ser explicados com base na resposta e desenvolvimento relativo das culturas, pois razões elevadas de areia/argila fosfática mostraram baixas concentrações de ^{226}Ra (pouca argila, pouca adsorção de radionuclídeos). Os tecidos com elevados teores de ^{226}Ra , também apresentaram altos índices de cálcio. Esta observação é importante porque a retenção de ^{226}Ra pelos seres humanos é inversamente relacionada aos teores de Ca na alimentação, de acordo com Einsenburd (1973 *apud* Mortvedt 1992). Possíveis efeitos negativos no consumo de plantas contendo elevadas concentrações de ^{226}Ra , poderiam ser compensados pelos altos teores de cálcio (Mortvedt, 1992).

A Tabela 27 mostra resultados da concentração de ^{226}Ra em 7 (sete) espécies de gramíneas desenvolvidas em rejeitos de argilas fosfáticas, e nos 5 (cinco) primeiros centímetros de camada de areia sobre as argilas, num período de 5 (cinco) anos, em experimento realizado por Mislev *et al.* (1989 *apud* Mortvedt 1992). Encontraram biomassas similares nos experimentos com ou sem camada de areia sobre os rejeitos, mas concentrações ligeiramente menores de ^{226}Ra foram detectadas nas plantas desenvolvidas nas camadas de areia.

TABELA 27 - CONCENTRAÇÃO DE ^{226}Ra EM FORRAGEIRAS DESENVOLVIDAS EM SOLOS DE ARGILAS FOSFÁTICAS PRÓXIMAS A ÁREAS DE MINERAÇÃO DE FOSFATOS E EM ÁREAS NÃO MINERADAS

Cultura	Área	
	Minerada	Não minerada
	(^{226}Ra , Bq/kg de material vegetal)*	
Capim elefante	3,3	1,1
Capim alemão	10	-
Grãos de sorgo	9,3	1,1
Folhas de sorgo	8,5	2,2
Leucena	4,8	-
Erianthus	8,9	0,7
Desmodium	13,7	-
Média	8,5	1,5

Modificado de Mortvedt (1992)

* Material vegetal seco

Grandes precipitações de ^{226}Ra , ^{230}Th e U dos efluentes do processo via úmida de produção de ácido fosfórico, quando o pH era elevado a valores maiores do que 6, foram relatadas por Guimond & Windham (1975 *apud* Mortvedt 1992). O *uptake* de radionuclídeos pelas plantas é em grande parte afetado pelo pH do solo, dependendo da espécie vegetal (Mortvedt 1986 *apud* Mortvedt 1992).

No Brasil a avaliação do aumento da radioatividade natural em solos agrícolas da região de Londrina (PR), resultante da aplicação de fosfogesso, está sendo estudada por Parreira *et al.* (1997). Os autores tiveram como objetivos verificar a sensibilidade de detecção dos radionuclídeos naturais em Latossolo Roxo distrófico (LRd), para se avaliar o quanto a radioatividade natural desse solo é alterada em função do uso do fosfogesso e fornecer subsídios para um estudo sistemático do comportamento de radionuclídeos (das famílias do ^{238}U e ^{232}Th) em solos agrícolas. O acréscimo observado nas áreas líquidas dos fotopicos mais proeminentes nas amostras de solo com fosfogesso variou em média de 18,3 a 25,7%, em relação ao solo natural. Essa variação foi observada para os seguintes radionuclídeos: ^{228}Ac (18,3%), ^{208}Tl (19,9%), ^{212}Bi (19,1%), ^{232}Th e ^{214}Pb (25,7%), ^{226}Ra (16,8%) e ^{214}Bi (19,1%). Pela lixiviação da amostra de solo + fosfogesso, os resultados sugeriram que houve carreamento de ^{212}Pb , ^{228}Ac , ^{208}Tl e ^{40}K .

4.5 Radionuclídeos em Redes de Drenagem

Nutrientes como o fósforo e o potássio, que não possuem uma fase natural sob forma de gás, precisam ser continuamente renovados, pois não possuem um ciclo completo, como os nutrientes mais solúveis (nitrogênio, carbono e enxofre), que ocorrem sob forma de gases voláteis e facilmente são reciclados. Aqueles nutrientes, se não forem interceptados pelas plantas ou retidos pelo solo, estão destinados a percorrerem as drenagens, rumo ao oceano (Miller, 1980). De acordo com Muller (1992 *apud* Guimond & Hardin 1989) e Mistry *et al.* (1970 *apud* Guimond & Hardin 1989), este também é o destino de vários radionuclídeos que estão incorporados aos fertilizantes potássicos e fosfatados. Grandes quantidades de nutrientes dos solos são removidas da superfície terrestre através de intemperismo e erosão. Trabalhos de Guimond & Hardin (1989) e Guimond (1978), relatam que o rio Mississippi (USA) e suas margens devem receber grandes quantidades de radionuclídeos provenientes da agricultura, através da erosão laminar, uma vez que este rio margeia dez estados norte-americanos grandes consumidores de fertilizantes fosfatados. Como resultado do uso massivo

de fertilizantes nestes estados, as perdas de nutrientes para os rios podem mostrar-se bem elevada. A estimativa de perdas de radionuclídeos por estes autores foi dificultada, devido a pouquíssimos dados sobre erosão laminar relacionados com radionuclídeos (Guimond & Hardin., 1989). Spalding e Sackett (1972 *apud* Guimond & Hardin 1989), examinaram a concentração de urânio em vários rios do Golfo do México. Seus estudos indicaram um aumento da concentração de urânio quando comparada com dados de 20 (vinte) anos anteriores nos mesmos rios. Atribuíram estes aumentos à aplicação generalizada de fertilizantes fosfatados pela atividade agrícola. O enriquecimento que estes autores observaram pode ser creditado a perdas por lixiviação e erosão do solo (Rothbaum *et al.*, 1979).

Spalding & Exner (1976), em pesquisa sobre a variação temporal de urânio no rio Brazos (USA), mostraram uma interessante relação sobre a contribuição deste radionuclídeo proveniente de fertilizantes fosfatados. O vale de Brazos encerra uma das principais áreas cultiváveis dos Estados Unidos, tendo atividade agrícola concentrada principalmente no início de cada ano. Em 21 (vinte e uma) amostras, registraram valores de 0,6 a 2,7 µg de urânio por litro, com concentração média de 1,4 µg U/l. Fazem um breve comparativo com trabalhos realizados durante os anos de 1961 e 1962 nesta área, os quais mostraram valores menores que 0,4 µg U/l. Uma fonte potencial de aumento de urânio no rio Brazos, foi o incremento do consumo de fertilizantes em cerca de 300%, de 1961 a 1971. Contribuições de urânio mostraram-se maiores durante o final do inverno e início da primavera. Observou-se que a concentração do urânio estava relacionada a diluição, ou seja, durante períodos de maior volume do rio e temperaturas mais baixas, os teores de urânio mostraram-se menores. Uma análise do fluxo de NO₃, P e urânio com as variações temporais do rio foi realizada. Observou-se que apesar do *run off* ser 4 (quatro) a 6 (seis) vezes maior durante as estações frias, estes elementos mostraram-se regularmente distribuídos durante todo o ano. Um pico de concentração de U foi encontrado durante o final de janeiro e início de fevereiro, coincidindo com períodos imediatamente após a fertilização. Os autores também referenciam resultados do próprio Spalding, no ano de 1972, os quais indicam que ocorreria uma contribuição média de 5 µg U/l no ano de 1971, se $2,7 \times 10^7$ g de urânio fossem adicionados como micronutrientes, oriundos das 60000 t de fertilizantes fosfatados, posteriormente solubilizados e carregados por *run off* para o rio Brazos. Assim, uma pequena percentagem deste urânio provavelmente contribuiu para o aumento do U no rio, verificado pelos autores. Contudo,

Zielinski *et al.* (1996) em estudo sobre acumulação de U no sistema de irrigação do sul do Colorado (EUA), revelaram que as altas concentrações de urânio dissolvidas no sistema de drenagem do Sixmile Creek, região intensivamente cultivada, eram preferivelmente resultantes de ocorrência natural de U ou lixiviação de solos do que pela contaminação de fertilizantes com U. Experimentos (colunas de solo que recebiam água de irrigação da área e fertilizantes fosfatados líquidos) para o estudo da lixiviação, revelaram a imobilidade do U dos fertilizantes nos solos e a identificação de um complexo de Ca-P-U que seqüestrava eficientemente o U adicionado com a solução fertilizante. Porém, o autor enfatiza que os métodos aplicados nesta pesquisa podem ser utilizados em outras áreas agrícolas onde o fertilizante é suspeito em contribuir com o U dissolvido nas águas locais. Estudos similares são necessários, porque a mobilidade do U dos fertilizantes, a natureza do P e precipitados ricos em U, variam em função das propriedades do solo (pH, umidade, mineralogia, textura), química da água dos poros e tipo do fertilizante aplicado.

5 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

5.1 Introdução

Os antigos sabiam que um tipo de mineral, a magnetita, quando colocado sobre um eixo sempre apontava para o norte. Este material, chamado de magneto era utilizado em navegações e foi primeiramente encontrado em uma antiga cidade grega, a Magnésia. Sabia-se também que quando um pedaço de metal de ferro era colocado próximo a um magneto, ele se tornava magnetizado. Substâncias como o ferro, que podem ser atraídas por um magneto e podem elas mesmas serem convertidas a magnetos, são denominadas substâncias magnéticas.

Segundo Sheriff (1973), susceptibilidade magnética é uma medida do grau de magnetização de uma substância, sendo diretamente proporcional ao volume de minerais magnéticos presentes nesta substância. É definida pela razão k ou k' entre a magnetização (M ou I) e a força magnetizante (H).

Apesar da susceptibilidade constituir uma grandeza adimensional, sua magnitude é distinta em função do sistema de medida adotado. Assim:

$$k = |M| / |H| \text{ no sistema SI (mks)}$$

$$k' = |I| / |H| \text{ no sistema emu (cgs)}$$

$$k = 4\pi k'$$

onde:

M ou I = magnetização; momento magnético por unidade de volume (ou por unidade de massa). Também é chamada de polarização magnética ou intensidade de magnetização;

H = força magnetizante; é a medida da influência de um campo magnético no meio;

Em pedologia, a susceptibilidade magnética pode ser observada no campo com um ímã para facilitar a identificação de solos desenvolvidos de rochas máficas. Segundo Resende *et al.* (1988), no Brasil, o uso do ímã como auxiliar de identificação de campo teve início na década de 60, no levantamento de solos do Estado de São Paulo, na distinção entre Latossolos Roxos e outros Latossolos, como os Latossolos Vermelhos-Escuros. A forte atração magnética de material de solos pelo ímã caracteriza-os como desenvolvidos de rochas (basaltos, diabásios, tufitos, etc.) ricas em minerais ferromagnéticos e, portanto, como um Latossolo Roxo.

Em geofísica aplicada, a susceptibilidade magnética de rochas e minerais é verificada através de instrumentos específicos e depende principalmente da quantidade, do tamanho dos grãos e do modo de distribuição dos minerais ferromagnéticos.

Como alguns dos solos da presente pesquisa são oriundos do intemperismo de rochas ricas em minerais máficos e/ou de contribuição destes materiais, o parâmetro susceptibilidade magnética tornou-se imprescindível na distinção de alguns solos. Também procurou-se associar susceptibilidade magnética e gamaespectrometria para se avaliar o comportamento dos radioelementos (U e Th) relacionados à presença de óxidos de ferro no solos. Assim, neste capítulo serão descritos resumidamente alguns fundamentos do magnetismo.

5.2 Magnetismo dos Materiais

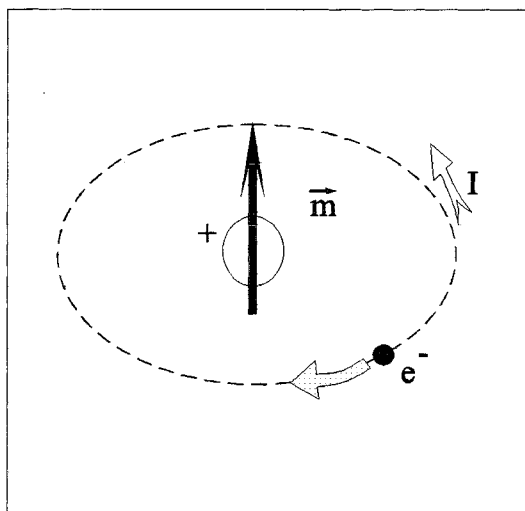
Resende *et al.* (1988), citam que a estrutura eletrônica de um átomo determina seu comportamento magnético. Um elétron, à semelhança dos movimentos de translação e rotação da Terra, gira em torno do núcleo (rotação orbital) e em torno de si mesmo (rotação em spin). Estas rotações são relacionadas com os momentos spin e magnético.

Segundo Luiz & Silva (1995), as substâncias ou materiais terrestres não apresentam o mesmo comportamento magnético quando submetidas a um campo magnético. Assim, se é criado um campo no eixo de um cilindro ao passar-se uma corrente através de espiras que o envolvem e, a seguir, diversos tipos de substâncias são aproximadas de uma de suas extremidades, pode-se observar que: (a) algumas substâncias podem ser atraídas e outras repelidas; (b) a força de atração ou repulsão não é mais intensa no centro do cilindro, onde o campo tem a máxima intensidade, mas às proximidades das extremidades do cilindro; (c) a força de atração varia em algumas dezenas de dinas (positiva no caso de atração e negativa na repulsão) até valores superiores a 100.000 dinas, dependendo do tipo de substância.

As substâncias que são repelidas são chamadas de diamagnéticas. Estas, quando submetidas a um campo magnético, adquirem magnetização de intensidade fraca e sentido contrário ao campo. A fraca intensidade de magnetização provém do pequeno valor de susceptibilidade magnética dessas substâncias. O sentido contrário ao do campo, lhes atribui um sinal negativo de susceptibilidade.

O diamagnetismo resulta do movimento dos elétrons em torno do núcleo dos átomos dos elementos. Esse movimento representa uma corrente (carga de deslocamento) circulando em volta do núcleo e cria, portanto um momento magnético dipolo (Figura 22).

FIGURA 22 - MOMENTO MAGNÉTICO



Modificado de Luiz & Silva (1995)

Aquelas substâncias que são atraídas, são denominadas de paramagnéticas. Sua magnetização é ainda fraca, devida a sua baixa susceptibilidade magnética. O seu sentido é igual ao do campo, conferindo um sinal positivo à susceptibilidade. A causa do paramagnetismo é devida a rotação em spin do elétron, ou seja, além do movimento de rotação do elétron em torno do núcleo (rotação orbital), o elétron movimenta-se em torno de si mesmo. Cabe ressaltar que substâncias paramagnéticas não apresentam, em sua maioria, pares de elétrons com spins em sentidos opostos, o que produziria o cancelamento dos momentos magnéticos como nas substâncias diamagnéticas. Assim, o paramagnetismo está associado aos materiais que apresentam número ímpar de elétrons, embora existam estruturas eletrônicas que possibilitam características paramagnéticas mesmo quando o número de elétrons é par. Os materiais paramagnéticos têm os momentos magnéticos do spin dispostos desordenadamente. Na presença de campo magnético externo, os momentos alinham-se com a direção do campo, permitindo que as características paramagnéticas sejam observadas.

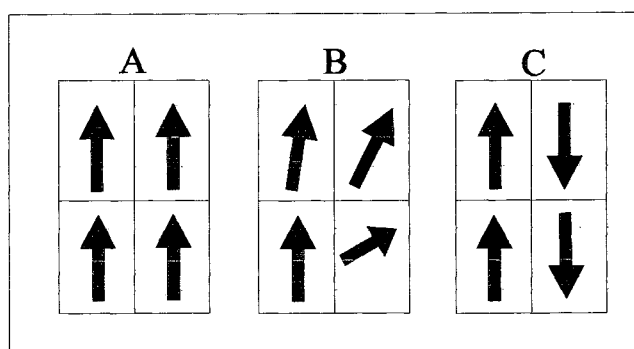
A susceptibilidade magnética nas substâncias diamagnéticas e paramagnéticas é constante.

Sob certas condições, substâncias paramagnéticas podem apresentar magnetização espontânea e estão associadas aos maiores valores de atração. Assim, elas passam a ser denominadas de ferromagnéticas. Estas, apresentam susceptibilidade magnética muito elevada e positiva, o que lhes permite uma magnetização com intensidade muito forte, no mesmo sentido do campo. A susceptibilidade magnética não é constante e depende da intensidade do campo externo. São caracterizadas por uma interação muito forte entre os elétrons,

favorecendo assim o alinhamento dos momentos magnéticos do spin mesmo na ausência de um campo magnético externo. Entretanto, muitos materiais ferromagnéticos exibem magnetização somente na presença de um campo externo ou exibem máxima magnetização na presença deste. A razão disto é que mesmo a nível de cristais isolados, são subdivididos em domínios ou células magnéticas, cujos momentos são orientados em direções diferentes. Assim eles podem ser classificados como verdadeiramente ferromagnéticos, ferrimagnético e antiferromagnético.

A Figura 23 mostra a representação esquemática dos domínios de um material ferromagnético. Em **A**, todos os domínios apresentam momento magnético com a mesma orientação, caracterizando-o como verdadeiramente ferromagnético, como pode ser observado no ferro, cobalto e níquel. Em **B**, apesar dos momentos magnéticos não serem igualmente orientados, existe uma resultante numa dada direção. Estes são os ferrimagnéticos como a magnetita, titanomagnetita, maghemita (hematita γ) e pirrotita. **C** mostra que a resultante da composição dos momentos é nula, o material é denominado de antiferromagnético, como é o caso da hematita, troilita e ilmenita.

FIGURA 23 - DOMÍNIOS DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS



Modificado de Luiz e Silva (1995)

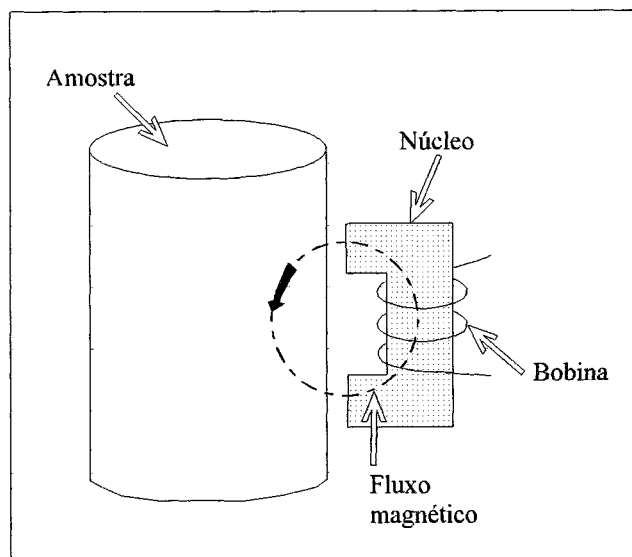
Cabe ressaltar que o ferromagnetismo é o responsável pela magnetização observada nos materiais geológicos. Nos trabalhos de prospecção, as anomalias magnéticas são devidas à presença isolada ou em conjunto dos minerais magnetita, pirrotita e ilmenita.

5.3 Medidores de Susceptibilidade Magnética

A Figura 24 mostra a representação esquemática da operação de um medidor de susceptibilidade magnética, o susceptibilímetro. As medidas podem ser realizadas no campo sobre afloramentos, ou em laboratório em amostras de rochas.

De acordo com Luiz & Silva (1995), o sensor deste instrumento é constituído por um núcleo em forma de U, de material de elevada permeabilidade magnética, enrolado por uma bobina. Ao passar uma corrente alternada pela bobina, desenvolve-se o fluxo de um campo magnético oscilante através do sistema sensor-ar. Quando é trazida uma amostra de rocha contendo minerais magnéticos para as proximidades do sensor, ocorre uma diminuição da relutância magnética no sistema sensor-amostra, pois a presença da amostra facilita o fluxo magnético. Assim, a diminuição da relutância provoca um aumento na indutância do sistema, que pode ser detectada e medida como uma variação de voltagem.

FIGURA 24 - ESQUEMA DE OPERAÇÃO DE UM SUSCEPTIBILÍMETRO



Modificado de Luiz & Silva (1995)

5.4 Susceptibilidade de Rochas e Minerais

Como já mencionado, a susceptibilidade magnética nas rochas depende, principalmente, da quantidade, tamanho dos grãos e modo e distribuição dos minerais ferromagnéticos.

A susceptibilidade magnética em rochas é mostrada na Figura 25. De acordo com Luiz & Silva (1995), os menores valores de susceptibilidade magnética são encontrados nas rochas sedimentares, ou seja, valores (cgs) inferiores a 50×10^{-6} . Nas rochas vulcânicas, a susceptibilidade varia entre 100×10^{-6} e 10.000×10^{-6} (cgs); nas plutônicas entre 100×10^{-6} e 5.000×10^{-6} (cgs). Dentro da faixa de 10×10^{-6} a 500×10^{-6} , estão as metamórficas. As rochas mais máficas devido aos maiores teores de ferro, são as que apresentam maiores valores de susceptibilidade magnética.

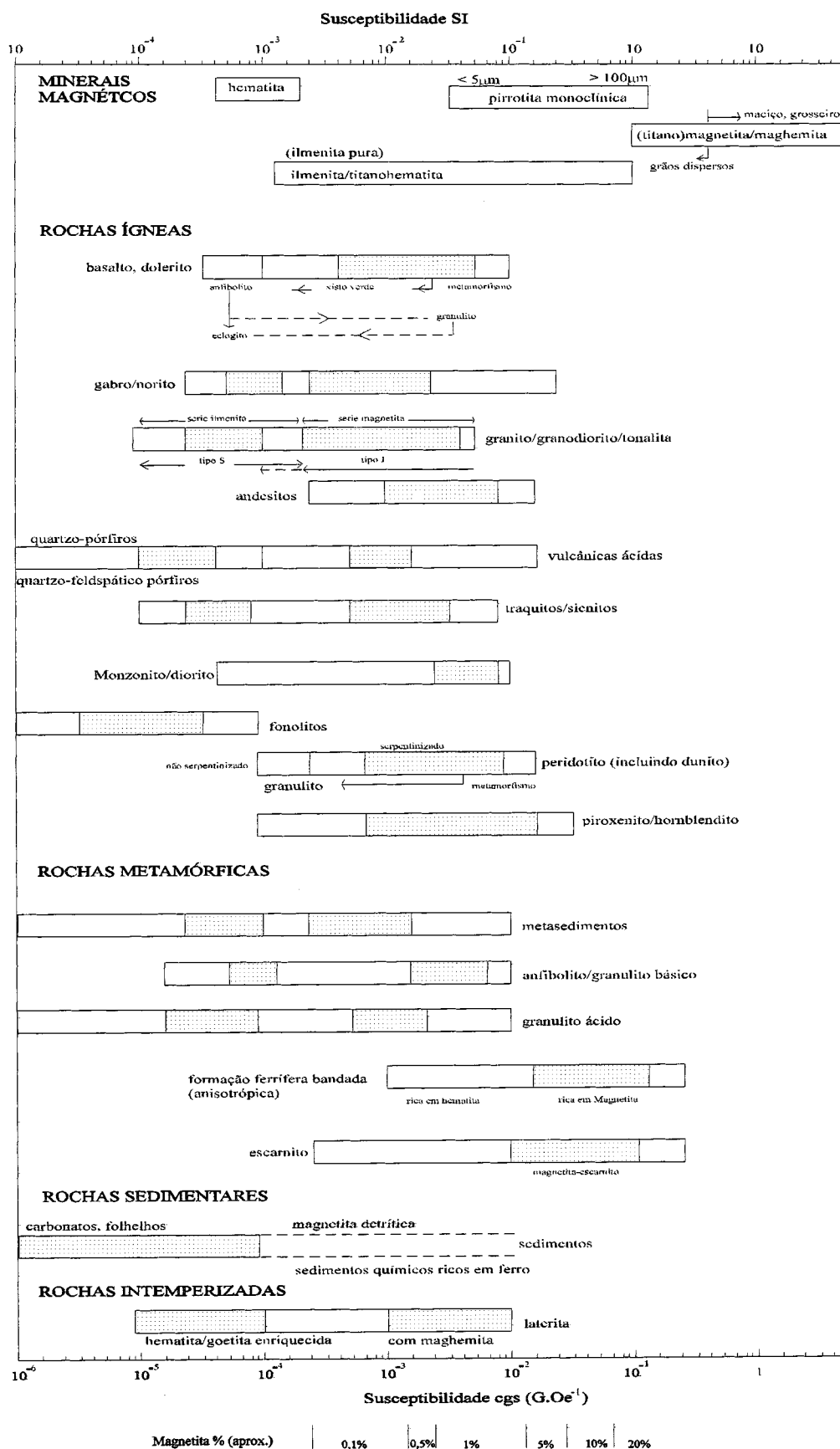
A susceptibilidade magnética, em minerais é mostrada na Tabela 28. Os minerais ferromagnéticos que apresentam susceptibilidade magnética suficientemente elevada para produzirem anomalias são: a magnetita, a pirrotita, a ilmenita, a franklita e a maghemita (hematita- γ).

TABELA 28 - SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM MINERAIS

Minerais	Variação ($\times 10^{-6}$ cgs)	Média ($\times 10^{-6}$ cgs)
Grafita [C]	-	-8
Quartzo [SiO ₂]	-	-1
Anidrita [CaSO ₄]	-	-1
Carvão [C]	-	2
Calcopirita [CuFeS ₂]	-	32
Esfarelita [ZnS]	-	60
Cassiterita [SnO ₂]	-	90
Pirita [FeS ₂]	4 - 420	130
Limonita [FeO(OH).nH ₂ O]	-	220
Arsenopirita [FeAsS]	-	240
Hematita [Fe ₂ O ₃]	40 - 3000	550
Cromita [FeCr ₂ O ₄]	240 - 9400	600
Franklinita [óxido de (Fe, Zn, Mn)]	-	3600
Pirrotita [FeS]	100 - 5×10^5	125000
Ilmenita [FeTiO ₃]	$2,5 \times 10^4$ - 3×10^5	$1,5 \times 10^5$
Magnetita [Fe ₃ O ₄]	10^5 - $1,6 \times 10^6$	5×10^5

Modificado de Luiz & Silva (1995)

FIGURA 25 - SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM ROCHAS



Modificado de Clark (1997)

6 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA

6.1 Geologia

A Quadrícula de Araras situa-se no contexto da Bacia do Paraná. É constituída de formações desde o Paleozóico até o Cenozóico.

O Paleozóico na área de estudo compreende as formações Itararé/Aquidauana e Tatuí do Grupo Tubarão e as formações Irati e Corumbataí do Grupo Passa Dois. O Mesozóico é representado pela Formação Pirambóia e diques e soleiras de diabásio da Formação Serra Geral (Grupo São Bento). Nas coberturas Cenozóicas encontram-se a Formação Rio Claro e correlatas, bem como os sedimentos aluvionares.

A Figura 26 mostra o mapa Geológico da região de estudo em escala 1: 500.000. Os dados foram oriundos do Mapa Geológico da Folha Campinas (IPT, 1993), escala 1:250.000. Assim, estão representados as seguintes unidades litoestratigráficas:

Qa: Aluviões recentes em geral, incluindo depósitos de terraços;

TQp: Formação Piraçununga - depósitos continentais incluindo acumulações elúvio-coluvionares de natureza areno-argilosa;

TQr: Formação Rio Claro - arenitos, arenitos conglomeráticos, arenitos argilosos e pequenas intercalações argilosas;

JKβ: Intrusivas Básicas Tabulares - soleiras diabásicas;

T_{Rip}: Formação Pirambóia - depósitos fluviais e de planícies de inundação incluindo arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, de estratificação cruzada ou plano-paralela, níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza areno conglomerática. Esta unidade, segundo Landim *et al.* (1980 *apud* Brollo 1991) marca o início da deposição mesozóica pré-vulcânica no Estado de São Paulo.

Pc: Formação Corumbataí - depósitos possivelmente marinhos de planícies de maré, incluindo argilitos, folhelhos e siltitos finos, arroxeados ou avermelhados, com intercalações de bancos carbonáticos, silexíticos.

Pi: Formação Irati - siltitos, argilitos e folhelhos silticos de cor cinza clara a escura, folhelhos pirobetuminosos, localmente em alternância rítmica com calcários cremes, silicificados, e restritos níveis conglomeráticos, membro pelítico persistente na base. IPT (1981 *apud* Brollo 1991), apresenta duas hipóteses para o ambiente de sedimentação da Formação Irati. A primeira diz que o ambiente é marinho de águas rasas, em bacia confinada, com clima favorável

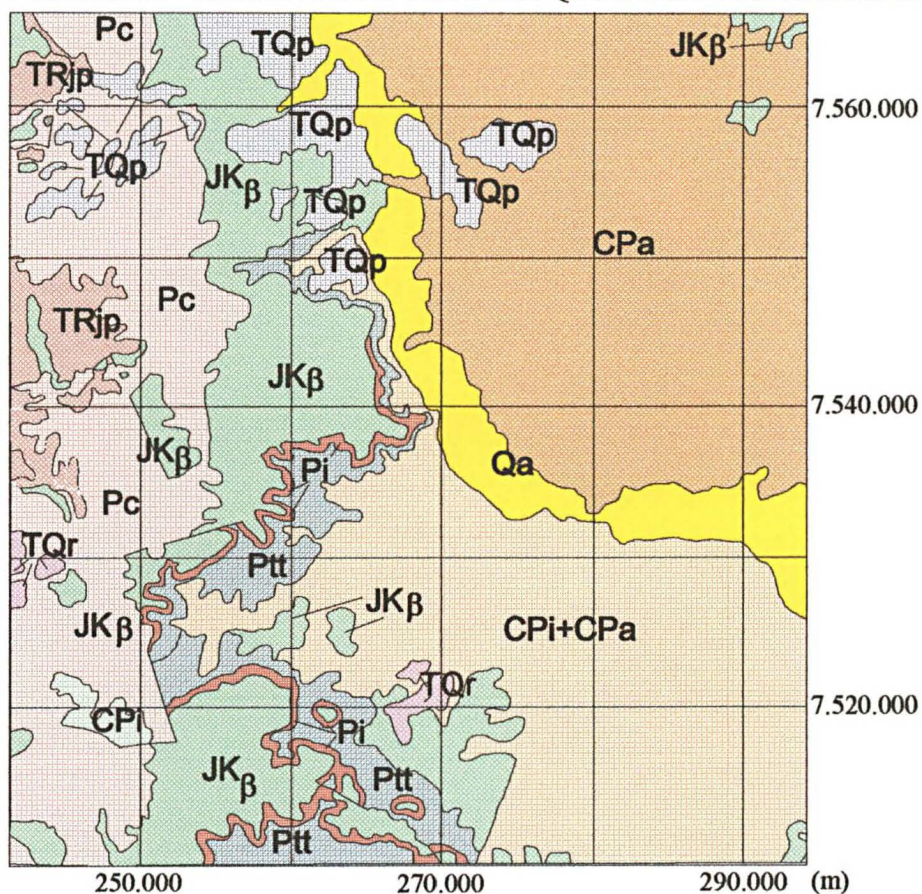
à precipitação de calcários, e condições físico-químicas favoráveis à dolomitização e acúmulo de matéria orgânica geradora dos pirobetumes. Pela outra hipótese, o ambiente de sedimentação seria de lagoas marginais em lenta subsidência, com estreita ligação com o mar, numa região de relevo baixo, coberta de vegetação luxuriante e sujeita a ritmos climáticos.

Ptt: Formação Tatuí - depósitos marinhos com estratificação plano-paralela, predominando siltitos, arenitos finos em parte concrecionados, calcários, sílex; cor vermelha arroxeada na parte inferior e esverdeada na parte superior;

CPi: Grupo Itararé - indiviso: depósitos glaciais, continentais, glácio-marinhos, fluviais, deltaicos, lacustres e marinhos, compreendendo principalmente arenitos de granulação variada, imaturos, passando a arcóseos; conglomerados, diamictitos, filitos, siltitos, folhelhos e ritmitos.

CPa: Formação Aquidauana - depósitos continentais predominantemente arenitos vermelhos arroxeados, médios a grossos, feldspáticos e subordinadamente arenitos finos, conglomerados, siltitos, folhelhos rítmicos e diamictitos.

FIGURA 26 - MAPA GEOLÓGICO DA QUADRÍCULA DE ARARAS



Legenda

Escala 1:500.000

 Qa - Aluviões do Quaternário	 Pi - Formação Irati
 TQp- Formação Piraçununga	 Ptt - Formação Tatuí
 TQr- Formação Rio Claro	 CPi - Formação Itararé
 JKβ- Soleiras Diabásicas	 CPa- Formação Aquidauana
 TRjp- Formação Pirambóia	 CPi + CPa
 Pc - Formação Corumbataí	

Modificado de IPT (1993)

6.2 Solos

Os dados pedológicos da presente Dissertação são oriundos do Levantamento Pedológico Semi-Detalhado do Estado de São Paulo, Quadricula de Araras, em escala 1: 100.000, realizado por Oliveira *et al.* (1982).

O referido levantamento identificou 22 “consociações” e 21 associações de solos pertencentes a 24 unidades taxonômicas. Os símbolos, o nome da unidade e classificação são mostrados na Tabela 29. Verifica-se, que as unidades taxonômicas são pertencentes a oito classes de solos, mostradas e descritas no mapa da Figura 27, em escala 1: 250.000.

6.2.1 Latossolos

São solos que apresentam um horizonte B latossólico com pelo menos 30 cm de espessura, imediatamente abaixo de um horizonte A fraco, moderado, proeminente ou chernozêmico e, quando a drenagem é deficiente, não apresentam horizonte *gley* a menos de 80 cm de profundidade (Oliveira *et al.*, 1982).

Dentre os solos da Quadricula de Araras os mais importantes do ponto de vista espacial são os Latossolos, que representam 79,3% da área estudada, distribuídos por 220.956 ha.

Em um nível categórico imediatamente abaixo, Oliveira *et al.* (1982) identificaram três classes de Latossolos: Latossolo Vermelho-Amarelo; Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo, com base no caráter álico, tipo de horizonte A e textura do horizonte B.

A distribuição espacial e percentual de tais Latossolos é mostrada na Tabela 30. Verifica-se que os Latossolos Vermelhos-Amarelos são os solos mais comuns da quadricula, seguidos das classes dos Latossolos Vermelhos-Escuros e Roxos.

TABELA 29 -UNIDADES DE SOLOS DA QUADRÍCULA DE ARARAS - SP

Símbolo	Unidade	Classificação
LRe	Ribeirão Preto	Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura muito argilosa ou muito argilosa.
LRd	Barão Geraldo	Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa ou argilosa.
LE-1	Limeira	Latossolo Vermelho-Escuro, álico, A moderado, textura argilosa.
LE-2	Hortolândia	Latossolo Vermelho-Escuro, álico, A moderado, textura média.
LV-1	São Lucas	Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, A moderado, textura média.
LV-2	Coqueiro	Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, A moderado, textura média.
LV-3	Laranja Azeda	Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, A moderado, textura média.
LV-4	Speculaas	Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, A proeminente, textura média.
LV-5	Mato Dentro	Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, A moderado, textura argilosa.
LV-6	Campininha	Latossolo Vermelho-Amarelo, câmbico, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada.
LV-7	Camarguinho	Latossolo Vermelho-Amarelo, húmico, álico, textura indiscriminada.
PV-1	Alva	Podzólico Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, abráptico, distrófico ou álico, A moderado espesso, textura arenosa/média.
PV-2	Usina	Podzólico Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, álico, A moderado, textura arenosa/média.
PV-3	Olaria	Podzólico Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, distrófico ou álico, A moderado, textura argilosa ou média/argilosa.
PV-4	Santa Cruz	Podzólico Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, abráptico, distrófico ou álico, A moderado, textura média/muito argilosa.
PV-5	Serrinha	Podzólico Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, abráptico, distrófico ou álico, A moderado espesso, textura arenosa/média.
TE	Estruturada	Terra Roxa Estruturada, eutrófica ou distrófica, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa.
AQ	-	Areias Quartzosas Profundas, álicas, A moderado.
Cb-1	Palha	Cambissolo, distrófico, A moderado, textura média.
Cb-2	Sete Lagoas	Cambissolo, álico, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, bem a imperfeitamente drenado.
Li-1	-	Solos litólicos, distróficos, A moderado, textura média, substrato arenitos do Grupo Tubarão.
Li-2	-	Solos litólicos, eutróficos ou distróficos, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, substrato sedimentos finos do Permiano.
Li-3	-	Solos litólicos, eutróficos, A moderado, textura argilosa, substrato basalto ou diabásio.
Hi	-	Gley Pouco Húmico e/ou Gley Húmico com ou sem ocorrência de solo orgânico.

Modificado de Oliveira *et al.* (1982)

TABELA 30 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS LATOSSOLOS DA QUADRÍCULA DE ARARAS

Classes	Área (ha)	Latosolos (%)	Total (%)
Latossolo Vermelho-Amarelo	125.134,5	56,6	44,9
Latossolo Vermelho-Escuro	58.306,2	26,4	20,9
Latossolo Roxo	37.515,4	17,0	13,5
Total	220.956,1	100	79,3

Modificado de Oliveira *et al.* (1982)

6.2.1.1 Latossolo Roxo

Segundo Oliveira *et al.* (1992), essa classe é formada por solos minerais não hidromórficos, vermelhos-escuros de tonalidades arroxeadas, derivados de rochas básicas e tufitos, apresentando horizonte B latossólico e teores elevados de Fe_2O_3 (>18% e <40%), MnO e, usualmente, de TiO_2 , com forte atração magnética e predominantemente de textura argilosa a muito argilosa. Esta classe de solo normalmente apresenta grande significado agrícola, pois, normalmente, encontra-se em relevo suave ondulado, declividade raramente superior a 7%, são profundos, porosos, bem permeáveis, friáveis, de fácil preparo, boa resistência a erosão (requerendo tratos de acordo com o declive). Contudo, pode apresentar algumas limitações, como a ocorrência de camadas adensadas devido ao uso de máquinas, que resultarão em menor porosidade, diminuição da permeabilidade e maior resistência à penetração da raiz no solo. A grande quantidade de óxidos de ferro, ou de ferro e alumínio e a textura argilosa, favorecem a adsorção de fósforo, requerendo doses relativamente maiores desse elemento do que outros solos que nunca receberam tal elemento.

Os Latossolos Roxos da Quadrícula de Araras, são solos provenientes do intemperismo de soleiras de diabásio, apresentando, em decorrência, além das características de Latossolo, elevados teores de hematita e magnetita e cores mais vermelhas que 3,5 YR com relação valor/croma igual ou inferior a 3,5/5, quando a drenagem não sofre limitações.

Devido a presença de ilmenita, esses solos apresentam teores relativamente altos de TiO_2 , em geral superiores a 3%, sendo também comum o manganês.

Forte atração pelo imã foi verificada pelos autores anteriormente mencionados, atribuindo-se esta propriedade aos elevados teores de magnetita. Esta propriedade foi utilizada no campo para diferenciá-los dos Latossolos Vermelhos-Escuros, aos quais se assemelham

bastante. Sua espessura atingiu vários metros, não observando-se solos menos profundos. Todos os pontos amostrados por Oliveira *et al.* (1988) e observados apresentaram textura muito argilosa ou argilosa no horizonte B, com baixos teores de areia grossa.

Segundo os autores do referido levantamento, os Latossolos Roxos identificados na área apresentaram grande homogeneidade nas características morfológicas e em algumas analíticas: granulometria, carbono e capacidade de troca de cátions. Em vista disso, a subdivisão em nível taxonômico mais baixo foi feita empregando apenas a saturação por bases e o teor de somas de bases do horizonte B2, tendo-se identificado duas unidades: Ribeirão Preto - Latossolo Roxo eutrófico e Barão Geraldo - Latossolo Roxo distrófico.

Ressaltam também que devido à identidade de características morfológicas e a aparente ausência de relação com parâmetros geomorfológicos diferenciais, bem como a intensa utilização agrícola com uso generalizado de insumos, a diferenciação no campo dessas duas unidades, nas áreas agricultadas, é praticamente impossível. A recorrência de dados analíticos é, nessas condições, imprescindível.

6.2.1.2 Latossolo Vermelho-Escuro

Segundo Oliveira *et al.* (1992), essa classe compreende solos minerais não hidromórficos, com horizonte B latossólico vermelho escuro, vermelho ou bruno avermelhado escuro de matiz 4YR ou mais vermelho, valores de 3 a 4 e croma de 4 a 6, teores de Fe_2O_3 provenientes do ataque sulfúrico na TFSA inferiores a 18%, quando argilosos ou muito argilosos, e usualmente inferiores a 8% quando de textura média, com atração magnética fraca ou inexistente. São solos formados a partir de material de origem muito diversa, o que lhes confere certa variabilidade nas características morfológicas, especialmente textura e consistência, além de influir nas propriedades químicas. Quanto ao significado agrônomo, são solos bons para agricultura, ocorrem em relevo pouco movimentado, apresentam grande espessura, e boa drenagem interna. São solos muito heterogêneos quanto a textura e fertilidade. Respondem bem a aplicação de corretivos e fertilizantes. O Latossolo Vermelho-Escuro, devido aos teores médios de óxido de ferro têm pouca magnetita, apresentando portanto, baixa susceptibilidade magnética. A amostra seca e triturada adere muito pouco ao ímã, enquanto que nos Latossolos Roxos a susceptibilidade magnética é maior.

De acordo com Oliveira *et al.* (1982), os Latossolos Vermelhos-Escuros de textura argilosa da Quadricula de Araras, são provenientes do intemperismo e retrabalhamento de

sedimentos finos: argilitos e siltitos com contribuição variada de rochas básicas, encontrando-se, por isso, solos com diversos teores de ferro total, enquanto os de textura média se originam de materiais mais grosseiros, resultantes do intemperismo e retrabalhamento de arenitos e siltitos, também com contribuição variada de rochas básicas.

Esses materiais de cobertura estão representados por espessos mantos detríticos de vários metros de espessura, identificáveis como tal pelas freqüentes linhas de seixos observáveis nos cortes mais profundos de estrada ou nas posições de meia encosta. Esses solos são, em geral, muito profundos.

Foram cartografadas duas unidades de Latossolos Vermelhos-Escuros: Limeira, relacionada com solos argilosos; Hortolândia, relacionada com solos de textura média.

6.2.1.3 Latossolo Vermelho-Amarelo

Segundo Oliveira *et al.* (1992), o conceito geral abrange solos minerais não hidromórficos, com horizontes B latossólicos, teor de Fe_2O_3 na TFSA proveniente do ataque sulfúrico igual ou inferior a 11% e normalmente maior que 7% quando de textura argilosa ou muito argilosa e não concrecionários. Quando concrecionários, são permitidos teores de Fe_2O_3 mais elevados. Nos de textura média, a relação molecular $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$, proveniente do ataque sulfúrico, é maior que 3,14. As cores deste horizonte são usualmente de matiz menos vermelho que 1,5 YR, tendo valores normalmente maiores que 4,5 e croma maior do que 6,0. São solos virtualmente sem atração magnética. Quando ocorrem em relevo plano e suave ondulado, são utilizados para pastagens aqueles que não têm elevados teores de areia. O relevo pode ser fator limitante, quando sua ocorrência se dá em topografia acidentada. Geralmente apresentam baixa fertilidade, baixo teor de bases trocáveis, de micronutrientes e de fósforo.

Com base no tipo, na espessura e no teor de carbono do horizonte A, na textura do horizonte B, na relação textural e na quantidade de minerais primários intemperizáveis, identificaram sete unidades de Latossolos Vermelhos-Amarelos: São Lucas, Coqueiro, Laranja Azeda, Speculaas, Mato Dentro, Sete Lagoas, Camarguinho.

6.2.2 Podzólico Vermelho-Amarelo

Esta classe, de acordo com Reunião de Classificação (1979 *apud* Oliveira *et al.* 1982), compreende solos com horizonte B textural, não hidromórficos, com individualização distinta

de horizontes, decorrente de acentuada diferença de textura, cor e estrutura, tendo sequência de horizonte A (A1, A2 e/ou A3), Bt e C normalmente com transições claras ou abruptas do A para o Bt. São moderadamente profundos a profundos (raramente rasos), com cores desde vermelho até amarelo no horizonte Bt. Por via de regra, apresentam um gradiente textural alto, com valores entre 2,0 e 2,4, tendo relações extremas de 1,5 e 8,0 ou mais.

Em níveis categóricos mais baixos, com base na transição abrupta, na espessura do horizonte A, na natureza do substrato geológico, na espessura do *sohum*, no desenvolvimento da estrutura do horizonte B, foram identificadas cinco unidades: Alva, Usina, Olaria, Santa Cruz e Serrinha.

6.2.3 Terra Roxa Estruturada

Segundo Oliveira *et al.* (1992) esta classe compreende solos minerais, não hidromórficos, constituem solos de cor vermelha escura ou tonalidade purpúrea ou nuances afins; efeito arroxeados; argilosos ou muito argilosos, derivados de rochas básicas, com teores relativamente altos de Fe_2O_3 (15%, mínimo constatado) e TiO_2 (1,5%), com baixo gradiente textural, estrutura em blocos e cerosidade moderada a bem desenvolvida; apresentam grande importância agronômica, pois quando eutróficos, apresentam elevado potencial nutricional e, quando distróficos ou álicos, respondem bem aos fertilizantes; em vista das suas qualidades, tais solos, abstraindo-se o relevo, são aptos a todos os usos agropastoril-florestais adaptados às condições climáticas.

Esses solos, segundo os autores do levantamento pedológico, diferem dos Latossolos Roxos por apresentarem horizonte B textural, e ocorrem, em geral, em relevos pouco mais movimentados, ocupando na paisagem o terço médio ou inferior das vertentes, quando o declive se torna ligeiramente mais íngreme (7 - 10%). Na quadricula, apresentaram pouca expressão espacial, identificando-se apenas 1423 ha, ou seja, 0,5% da área total.

Uma única unidade de mapeamento foi identificada, a Estruturada, que ocorre como unidade de mapeamento simples, quer associada a unidade Barão Geraldo ou a Litossolos substrato básico.

6.2.4 Areias Quartzosas

Segundo Oliveira *et al.* (1982), as Areias Quartzosas compreendem solos desenvolvidos sobre material de origem arenosa, apresentando perfil constituído por um horizonte A fraco ou moderado, raramente proeminente, sob um regolito inconsolidado, pouco diferenciado. A fração areia, essencialmente representada pelo quartzo, é igual ou superior a 70%, e a fração argila é inferior a 15%. Os minerais primários intemperizáveis são virtualmente inexistentes ou estão presentes em reduzidíssimas quantidades (<3%).

No levantamento pedológico da Quadricula de Araras, identificaram-se Areias Quartzosas desenvolvidas em espessos mantos coluviais de sedimentos detríticos: Areias Quartzosas Profundas. Esta classe de solos, apresenta espessura superior a 200 cm e ausência de hidromorfismo a menos de 80 cm de profundidade. Em consequência dos elevados teores de areia, não apresentam organização textural definida, ou quando existente, é representada por estrutura subangular fraca.

6.2.5 Cambissolos

Consideram-se Cambissolos aqueles solos que apresentam horizonte B incipiente (B câmbico) subjacente a um horizonte A proeminente, moderado ou fraco, ou A chernozêmico. Nesse caso, os cambissolos são sobrejacentes a um horizonte B incipiente com saturação em base inferior a 50%, ou ainda, os solos que não apresentam outros horizontes diagnósticos que não o horizonte A turfosos ou proeminente (Oliveira *et al.*, 1982).

Esta classe representa apenas 1,4% da área da quadricula (3.808 ha) e nas planícies aluvionares que margeiam o rio Moji-Guaçu, ocorrem associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos (unidade Campininha) e nas áreas elevadas aos Podzólicos da unidade Usina. Foram identificadas duas unidades: Palha e Sete Lagoas.

6.2.6 Solos Litólicos

De acordo com Oliveira *et al.* (1982), os solos Litólicos têm como característica principal a pequena espessura do *solum*, inferior a 40 cm. Esses solos apresentam horizonte A fraco, moderado, proeminente ou chernozêmico, diretamente assentados sobre a rocha (A, R), sobre horizonte C de pequena espessura (A, C, R), ou horizonte B incipiente de apenas poucos

centímetros [A, (B), C, R]. Em consequência da imaturidade, esses solos apresentam usualmente teores relativamente elevados de minerais primários menos resistentes ao intemperismo e de alta capacidade de troca de cátions da fração argila.

Na Quadricula de Araras, segundo os autores mencionados, observou-se horizonte A moderado e proeminente, sendo a sequência A, C, R a mais comum; a espessura do solo raramente ultrapassou 30 cm.

6.2.7 Solos Hidromórficos

Compreendem uma classe de solos em alto nível categórico, na qual a característica mais importante é a presença de horizonte *gley* a menos de 80 cm de profundidade (Oliveira *et al.*, 1982). O horizonte *gley*, resultante de marcante processo de redução, decorrente de um regime aquítico, apresenta cores neutras com ou sem mosqueamento proeminente ou distinto. Excluem-se dessa conceituação os Vertissolos, os solos com B textural e as Areias Quartizosas Hidromórficas.

Na Quadricula de Araras, foram identificadas as seguintes classes de solos hidromórficos: *gley* húmico, *gley* pouco húmico e *gley* orgânico. Os autores do levantamento pedológico citam que por motivo de escala, dificuldade de penetração nas áreas alagadiças e pela complexidade de distribuição, eles foram cartografados em nível categórico mais elevado como solos Hidromórficos, quer constituindo unidade de mapeamento simples, quer associados com Latossolos Vermelho-Amarelos câmbicos (unidade Campininha), quer Cambissolos fluviais (unidade Sete Lagoas).

6.2.8 Associação de Solos

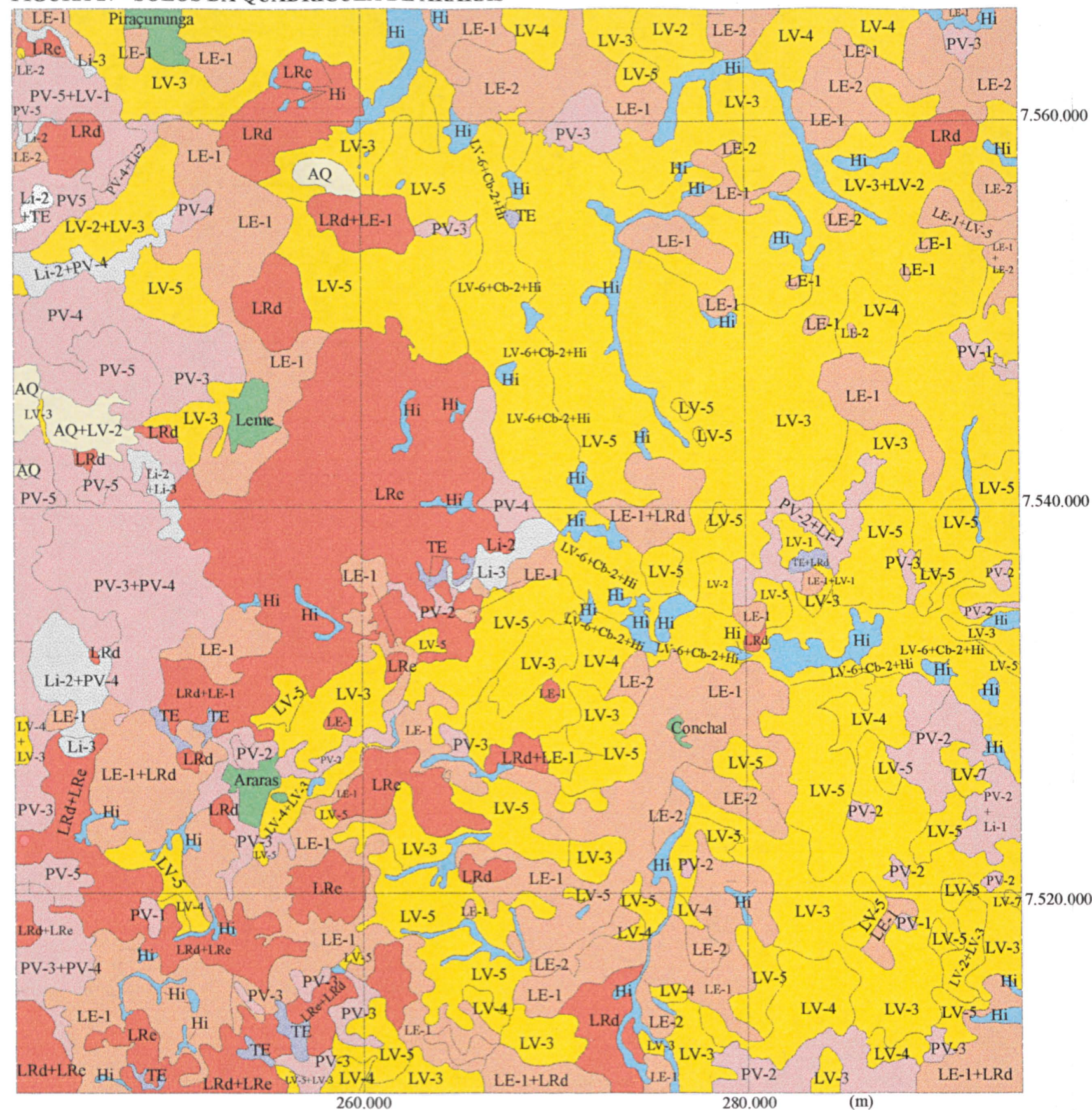
As associações cartografadas na Quadricula de Araras, segundo Levantamento Pedológico Semi-Detalhado do Estado de São Paulo (Oliveira *et al.*, 1982), são mostradas na Tabela 31.

TABELA 31 - RELAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES CARTOGRAFADAS NA QUADRÍCULA ARARAS

Símbolo no mapa	Unidade
LRe + LRd	Ribeirão Preto + Barão Geraldo
LRd + LE-1	Barão Geraldo + Limeira
LE-1 + LRd	Limeira + Barão Geraldo
LE-1 + LE-2	Limeira Hortolândia
LE-1 + LE-5	Limeira + Mato Dentro
LV-2 + LV-3	Coqueiro + Laranja Azeda
LV3 + LV-2	Laranja Azeda + Coqueiro
LV-4 + LV-3	Speculaas + Laranja Azeda
LV5 + LV-3	Mato Dentro + Laranja Azeda
PV-2 + Cb-1	Usina + Palha
PV-2 + Li-1	Usina + Solos litólicos substrato arenito Grupo Tubarão
	Tubarão
PV-3 + PV4	Olaria + Santa Cruz
PV-4 + PV-3	Santa Cruz + Olaria
PV-4 + Li-1	Santa Cruz + Solos litólicos substrato arenito Tubarão
PV-5 + LV-5	Serrinha + São Lucas
TE + LRd	Estruturada + Barão Geraldo
LV-6 + Cb-2 + Hi	Campininha + Sete Lagoas + Solos Hidromórficos
Li-1 + PV-4	Solos Litólicos substrato arenito Grupo Tubarão + Santa Cruz
Li-1 + Li-2	Solos Litólicos substrato arenito Grupo Tubarão + Solo Litólico substrato sedimentos finos de Permiano
Li-2 + TE	Solos Litólicos substrato sedimentos finos do Permiano + Estruturada
AQ + LV-2	Areia Quartzosa Profunda + Coqueiro

Modificado de Oliveira *et al.* (1982)

FIGURA 27 - SOLOS DA QUADRÍCULA DE ARARAS



Escala 1:250.000

Legenda:

- Latossolo Roxo**
 LRe - Eutrófico, A moderado, textura muito argilosa. Unidade Ribeirão Preto
 LRd - Distrófico, A moderado, textura muito argilosa ou argilosa. Unidade Barão Geraldo
- Latossolo Vermelho Escuro**
 LE-1 - Álico, A moderado, textura argilosa. Unidade Limeira
 LE-2 - Álico, A moderado, textura média. Unidade Hortolândia
- Latossolo Vermelho Amarelo**
 LV-1 - Álico, A moderado, textura média. Unidade São Lucas
 LV-2 - Álico, A moderado, textura média. Unidade Coqueiro
 LV-3 - Álico, A moderado, textura média. Unidade Laranja Azeda
 LV-4 - Álico, A proeminente, textura média. Unidade Speculass
 LV-5 - Álico, A moderado, textura argilosa. Unidade Mato Dentro
 LV-6 - Câmbico, Álico, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada. Unidade Campininha
 LV-7 - Húmico, Álico, textura indiscriminada. Unidade Camarguinho
- Podzólico Vermelho Amarelo**
 PV-1 - Argila de atividade baixa, abruptico, distrófico ou álico, A moderado espesso, textura arenosa/média. Unidade Alva
 PV-2 - Argila de atividade baixa, álico, A moderado, textura arenosa/média. Unidade Usina
 PV-3 - Argila de atividade baixa, distrófico ou álico, A moderado, textura argilosa ou média argilosa. Unidade Olaria
 PV-4 - Argila de atividade baixa, abruptico, distrófico ou álico, A moderado, textura média/muito argilosa. Unidade Santa Cruz
 PV-5 - Argila de atividade baixa, abruptico, distrófico, A moderado espesso, textura arenosa/média. Unidade Serrinha
- Terra Roxa Estruturada**
 TE - Eutrófica ou distrófica, A moderado, Unidade Estruturada
- Areias Quartzosas Profundas**
 AQ - Álicas, A moderado
- Solos Litólicos**
 Li-1 - Distróficos, A moderado, textura média, substrato arenitos do Grupo Tubarão
 Li-2 - Eutróficos ou Distróficos, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, substrato sedimentos finos do Permiano
 Li-3 - Eutróficos, A moderado, textura argilosa substrato basalto ou diabásio
- Solos Hidromórficos**
 Hi - Gley pouco húmicos e/ou Gley Húmico com ou sem ocorrência de Solo Orgânico
- Cambissolos**
 Cb-1 - Distrófico, A moderado, textura média. Unidade Palha
 Cb-2 - Álicos, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, bem a imperfeitamente drenados. Unidade Sete Lagoas

Modificado de Oliveira et al. (1981)

6.3 Formações Superficiais

De acordo com Oliveira (1971 *apud* Freitas *et al.* 1979), formação superficial é toda formação ou depósito continental, marinho ou de ambas as origens, móveis ou secundariamente consolidadas, que tenham ou não sofrido a ação de agentes de transporte e originado da desagregação física e/ou da alteração química das rochas.

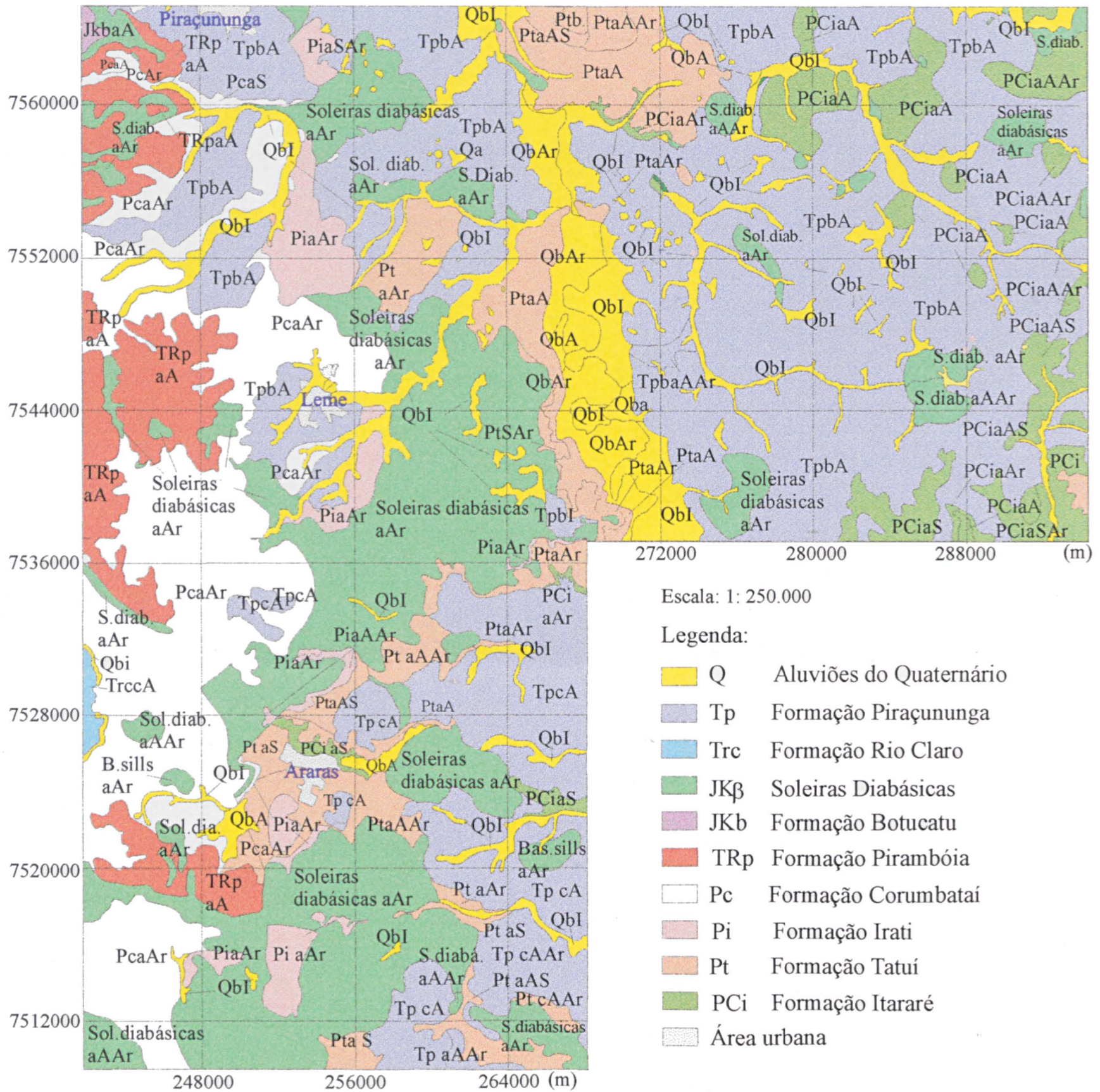
Os dados de formações superficiais da Quadrícula Araras, são provenientes do Projeto de Levantamento de Formações Geológicas de Superfície, realizado pelo Instituto Geológico (IG), iniciado a partir do ano de 1976.

Além do mapeamento geológico e estrutural, o referido projeto buscou dar ênfase às formações superficiais, caracterizando-as em termos de autoctonia, espessura e granulometria.

Freitas *et al.* (1979), citam que consideraram como formação superficial apenas o horizonte B. Os estudos de campo foram feitos pela observação de afloramentos, contatos, estruturas, fósseis, etc. bem como pela execução de sondagens com o objetivo de determinar a espessura das formações superficiais e o comportamento das formações geológicas. Nas amostras coletadas em superfície e subsuperfície, procederam análises granulométricas.

A Figura 28 mostra o mapa de formações superficiais da Quadrícula de Araras em escala 1:250.000, oriundo deste projeto realizado pelos profissionais do IG. Corresponde às formações das folhas de Leme (1:50 000), Araras (1:50 000) e Rio Capetinga (1:50 000). Cabe ressaltar que os dados de espessura não foram discriminados nesta figura. Entretanto, combinou-se todas as informações geológicas com a autoctonia e granulometria.

FIGURA 28 - FORMAÇÕES SUPERFICIAIS DA QUADRÍCULA ARARAS



Onde,

a = regolito

b = depósitos aluvionais

c = depósitos coluvionais

A = areia

Ar = argila

S = silte

I = indeterminada

Granulometria

Modificado de IG (1980); IG (1981); IG (1987)

6.4 Uso Agrícola dos Solos

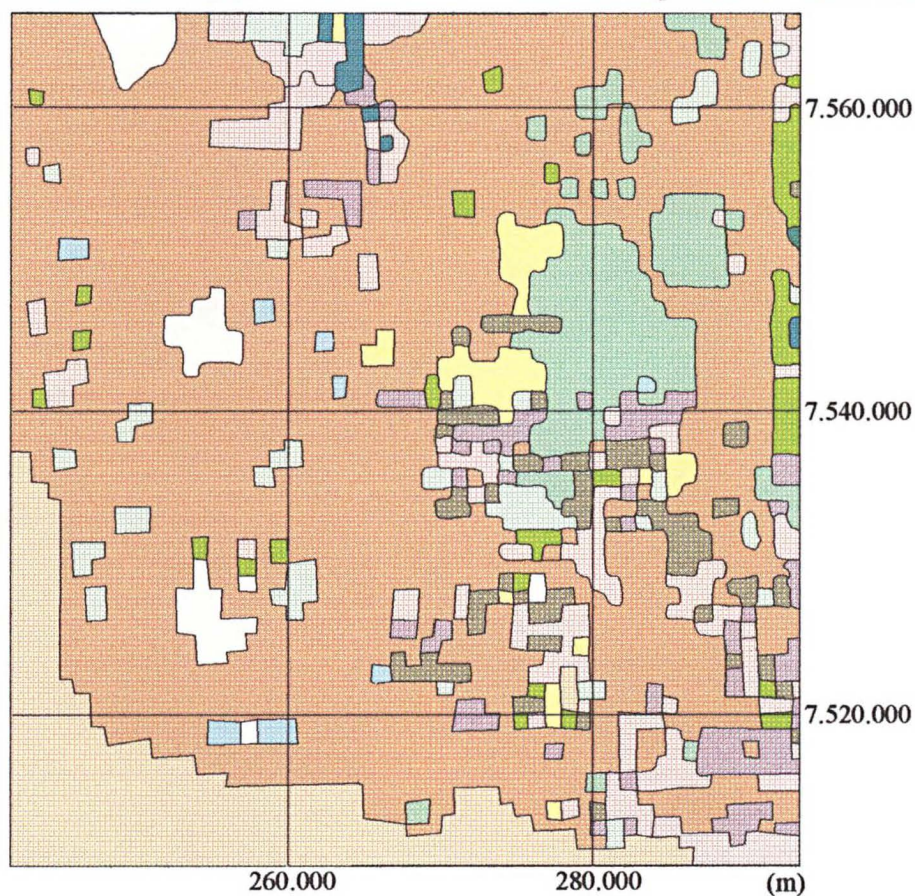
A agricultura da Quadricula de Araras é representada em ordem de importância espacial pela cana-de-açúcar, citrus e, em menor proporção, por culturas anuais.

A cultura de cana-de-açúcar, se desenvolve principalmente sobre os solos pouco movimentados, de textura argilosa provenientes de materiais oriundos de rochas básicas.

Pastagem e reflorestamento ocupam áreas mais movimentadas e menos adequadas à lavoura, porém constituem atividades de pequena importância espacial, mormemente o reflorestamento.

A Figura 29, mostra o mapa de uso agrícola do solo da referida região.

FIGURA 29 - MAPA DE USO AGRÍCOLA DA QUADRÍCULA ARARAS



Legenda

Escala 1: 500.000

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| Floresta | Pasto sujo/macega |
| Vegetação de porte arbóreo | Pastagem |
| Reflorestamento | Cultura temporária |
| Capoeira/cobertura residual | Espelho d'água |
| Cultura perene | Área urbana |
| Cana-de-açúcar | Não determinado |

Modificado de IPT (1985)

7 MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Materiais Utilizados

Foram os seguintes materiais utilizados na presente pesquisa:

- dados aerogamaespectrométricos digitais de K, U, Th e contagem total, obtidos do levantamento aerogeofísico Projeto São Paulo - Rio de Janeiro, executado pela ENCAL S.A. Consultoria e Aerolevantamentos, entre os anos de 1978 e 1979, para a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (Anjos & Mourão, 1988);
- imagem de satélite TM Landsat, bandas 3, 4 e 5;
- mapa geológico da Folha Campinas (SF.23-Y-A), escala 1: 250.000 (IPT, 1993);
- mapa de levantamento semi-detalhado de solos da Quadricula de Araras (SP) (SF.23-Y-AII), em escala 1:100.000 (Oliveira *et al.*, 1982);
- formações superficiais:
 - a) Leme: Formações Superficiais - Folha Geológica de Leme (SF.23-Y-A-II-1), escala 1:50.000 (IG, 1980);
 - b) Araras: Formações Geológicas de Superfície - Folha Geológica de Araras (SF.23-M-II-3), escala 1:50.000 (IG, 1987);
 - c) Rio Capetinga: Formações Geológicas de Superfície, Folha Geológica de Rio Capetinga (SF.23-Y-A-II-2), escala 1:50 000 (IG, 1981);
- mapa de uso do solo, em escala 1: 250.000, fornecido pelo IPT (1993) e obtido a partir da interpretação da banda 5 da imagem de satélite Landsat TM;
- folhas topográficas:
 - a) Leme: Folha SF-23-Y-A-II-1, escala 1:50.000 (IBGE, 1971);
 - b) Araras: Folha SF-23-M-II-3, escala 1:50.000 (IBGE, 1969);
 - c) Rio Capetinga: Folha SF-23-Y-A-II-2, escala 1:50.000 (IBGE, 1971);
 - d) Conchal: Folha SF-23-Y-A-II-4, escala 1:50.000 (IBGE, 1974).
- equipamentos:

Os equipamentos de informática utilizados pertencem ao Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Solos, Setor de Ciências Agrárias da UFPR e ao Laboratório de

Processamento de Dados Geológicos do Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia da UFPR, e estão representados por:

- a) mesas digitalizadoras;
- b) microcomputadores *pentium* MMX, 166 MHz;
- c) impressoras jatos de tinta A3 e convencional;

• *Softwares:*

- a) AutoCAD, versão 12;
- b) SGI/SITIM;
- c) Geosoft, versão 4.03;
- d) Idrisi *for Windows*, versão 2.0.

7.2 Geoprocessamento

Segundo Rodrigues (1990), geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e de uso e desenvolvimento, de sistemas que utilizam tais informações. As áreas que se servem das tecnologias de geoprocessamento têm em comum o interesse por entes de expressão espacial, sua localização ou distribuição, ou ainda a disposição espacial dos atributos.

Um sistema que surgiu como um meio de reunir e analisar diversos dados espaciais (Star & Estes, 1990), é o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Segundo Alves (1990), são sistemas destinados ao tratamento de dados espacialmente referenciados. Estes sistemas manipulam dados de diversas fontes como mapas, imagens de satélite, cadastros e outras, os quais permitem recuperar e combinar informações, além de efetuar os mais diversos tipos de análise sobre os dados.

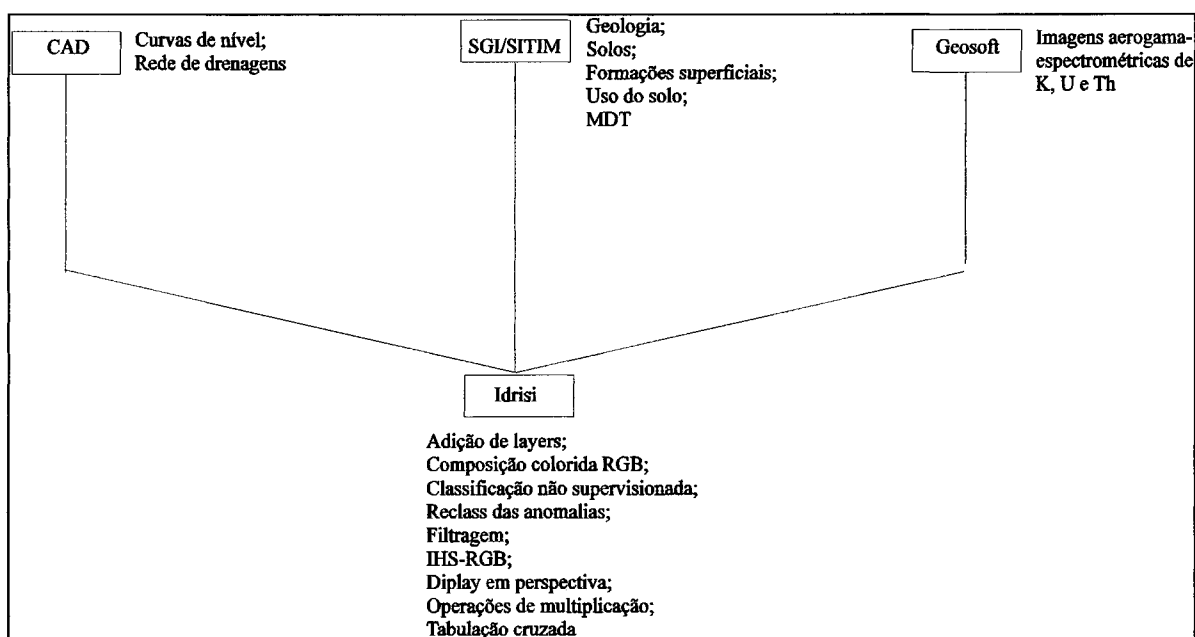
Hanigan (1988 *apud* Silva 1995), define SIG como qualquer sistema de gerenciamento de informações capaz de: coletar, armazenar e recuperar informações baseadas nas suas localizações espaciais; identificar locais dentro de um ambiente que tenha sido selecionado a partir de determinados critérios; explorar relações entre os dados de um certo ambiente; analisar os dados espaciais para subsidiar os critérios de tomada de decisões; facilitar a exportação de modelos analíticos capazes de avaliar alternativas de impactos no meio ambiente; exibir e selecionar áreas, tanto graficamente como numericamente, antes e/ou depois das análises.

Peralta (1996), cita que a capacidade de reunir um conjunto de dados que está representado em formas complexas e diferentes, é uma das vantagens do Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Frente a necessidade de integrar os dados aerogamaespectrométricos digitais de K, U e Th da região de Araras (SP), com dados provenientes de diversas fontes, como mapas de solos, geológicos, de formações superficiais, de curvas de nível, de rede de drenagens, bem como imagens orbitais da área de pesquisa, optou-se pela manipulação dos dados em ambiente SIG.

O diagrama esquemático do caminho percorrido pelas diferentes fontes de dados da presente pesquisa, é mostrado na Figura 30.

FIGURA 30 - CAMINHO PERCORRIDO PELAS DIFERENTES FONTES DE DADOS



A metodologia utilizada procurou seguir uma ordem lógica dentro das expectativas do projeto: revisão bibliográfica, pré-processamento das informações aerogamaespectrométricas, construção da base digital, processamento e integração dos dados.

7.2.1 Pré-processamento dos Dados Aerogamaespectrométricos

O uso dos dados aerogamaespectrométricos sob a forma de imagens, exigiu uma etapa de pré-processamento dos dados brutos, na geração de malhas de 125 x 125 metros, pelo

método de interpolação da Curvatura Mínima (Briggs, 1974), em *software* específico para dados aerogeofísicos, como o *Geosoft*, versão 4.03.

Cabe ressaltar que esta etapa de pré-processamento, não incluiu, as correções de rotina de levantamentos aerogamaespectrométricos, como as de altura, de *background*, e do efeito Compton, uma vez que os dados digitais brutos de K, U, Th e contagem total, foram cedidos pela CPRM já corrigidos.

7.2.2 Construção da Base Digital de Dados

A digitalização, é o processo de conversão de pontos e linhas de um mapa convencional para um formato compatível ao uso em computador (Tomlinson & Boyle 1981 *apud* Scarim e Teixeira 1994).

A construção da base digital de dados da presente pesquisa, foi realizada através da digitalização manual de temas específicos, como curvas de nível, rede de drenagens, geologia, solos e formações superficiais. Como resultado da digitalização manual, os dados são representados em formatos vetoriais.

Nas representações vetoriais, os domínios espaciais são representados por um conjunto de traços, deslocamentos ou vetores, adequadamente referenciados. Associam-se coordenadas a pontos, linhas e áreas convenientemente selecionadas segundo regras estabelecidas (Rodrigues, 1990).

De acordo com o Manual de Descrição do SGI (ENGESPAÇO, 1989), formatos de representação vetorial consistem de listas de coordenadas 2D que delimitam regiões temáticas ou representam redes. A representação vetorial de um objeto é uma tentativa de reproduzi-los tão exatamente quanto possível, procurando definir precisamente todas as posições, comprimentos e dimensões das entidades geográficas.

A rede de drenagem e as curvas de nível, estas últimas espaçadas em 20 m, provenientes de cartas topográficas em escala 1:50.000 das Folhas de Leme, Araras, Conchal e Rio Capetinga, foram digitalizados em CAD (*Computer Aided Design*) - AutoCAD versão 12, seguindo-se os comandos referentes a limitação da área, calibração da mesa digitalizadora, criação de *layers*, digitalização e edição das polilinhas, valores de Z para as curvas de nível, conversão para DXF.

A obtenção de dados vetoriais de solos, geológicos e de formações superficiais em ambiente SIG, realizado no SGI/SITIM, leva a necessidade do conhecimento de alguns elementos básicos pelos quais a representação vetorial deste sistema faz uso, bem como de algumas considerações sobre o processo de inserção dos dados neste sistema.

De acordo com o Manual de Descrição do SGI, a representação vetorial faz uso dos seguintes elementos básicos:

- pontos: entidades geográficas localizáveis por um único par de coordenadas (X,Y); usualmente, um ponto não é um símbolo relacionado a qualquer outra informação;
- arcos: conjunto de coordenadas (X,Y), que descreve uma linha contígua no espaço;
- nós: pontos inicial e final de cada arco; a estes nós, está associada a informação topológica (quais linhas são incidentes);
- polígonos: compreendem regiões limitadas por arcos; no SGI, uma região será sempre representada por um polígono; cada polígono é construído a partir da lista de arcos que o define;
- centróides: pontos interiores a um polígono, utilizados para associar os atributos de cada região e para a construção de um polígono a partir de arcos que o limitam (operação denominada de poligonização).

Além de formatos vetoriais, o SGI/SITIM também é capaz de tratar os dados em formatos varredura (*raster*), amostras 3D e grade regular.

Nas representações de varredura (ou matriciais), os domínios espaciais são representados por um conjunto de células, na maioria das vezes quadradas, sobre as quais incidem os pontos, linhas e áreas (Rodrigues, 1992).

Cada célula, ou cela ou pixel, é referenciado por índices de linha e coluna e contém um número representando o tipo ou o valor do atributo mapeado. Os valores de cada pixel estão limitados num certo intervalo, usualmente de 0 a 255.

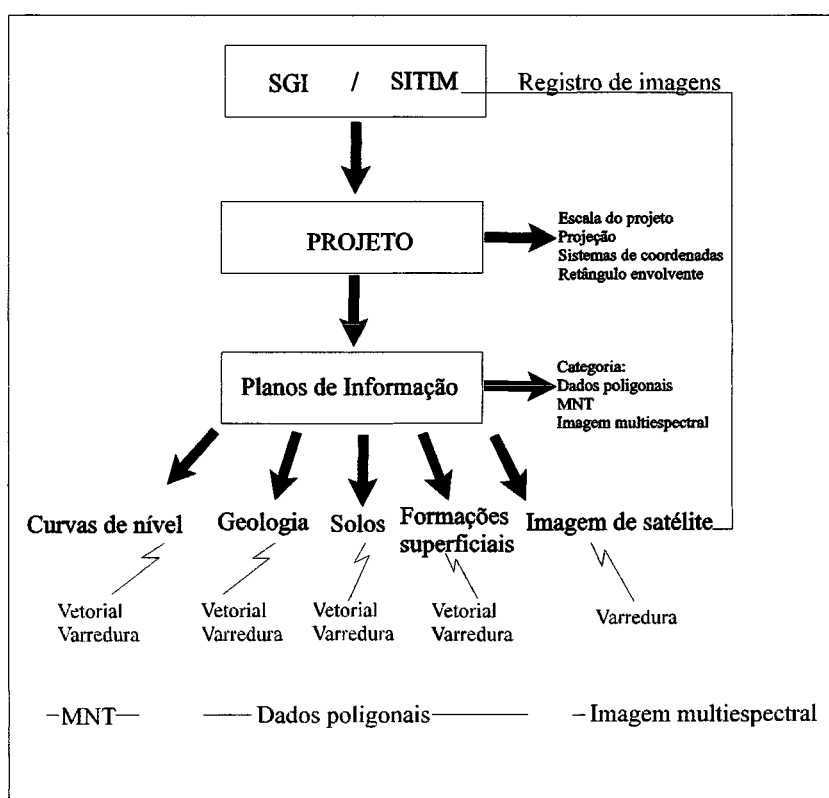
Crósta (1993), cita que as imagens de sensoriamento remoto, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou *grid*. Cada cela desse *grid* tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo linha e coluna. A origem do *grid* é sempre no seu canto superior esquerdo. O atributo Z, que indica o nível de cinza dessa cela ou pixel, representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. O nível de cinza de um pixel, também conhecido como DN (*Digital Number*), corresponde sempre à

média da intensidade de energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel.

Os dados cartográficos também podem ser convertidos para esta representação. Os dados vetoriais, de solos, geológicos e de formações superficiais, como será visto adiante, sofreram esta transformação para que se pudesse realizar algumas operações de integração com dados aerogamaespectrométricos. Estes sofreram uma compressão original, transformando-se em uma imagem de 8 bits para cada canal, ou seja, 256 níveis de cinza.

Os dados no SGI, foram estruturados, como mostrado no desenho esquemático da Figura 31.

FIGURA 31 - ESTRUTURA DOS DADOS NO AMBIENTE SGI/SITIM



Os Planos de Informação (PIs) são agrupados em categorias, conforme a natureza da informação geográfica. O Plano de Informação (PI), reúne todas as representações de um mesmo dado geográfico. No início do projeto, define-se os PIs indicando suas principais características. Assim, um plano de informação correspondente a curvas de nível, por exemplo, que pertence à categoria MNT (Modelo Numérico do Terreno), pode conter as representações

vetoriais (isolinhas), bem como a sua representação em imagem. A imagem de satélite, para ser manipulada como um plano de informação, deve estar georeferenciada previamente, no caso, no módulo SITIM.

Os dados do Projeto foram:

Nome: ARA;

Projeção: UTM/Córrego Alegre;

Meridiano central: 45° Oeste;

Escala: 1:100.000;

Retângulo envolvente: $x_0 = 240\ 000$; $x_1 = 296\ 000$; $y_0 = 7\ 508\ 000$; $y_1 = 7\ 568\ 000$ (m).

Os PIs de categoria poligonal, como solos, geologia, formações superficiais e uso do solo, após digitalização dos dados provenientes de mapas, sofreram um ajuste manual das linhas, inserção de centróides e poligonização.

Para se inserir os centróides, definiu-se previamente o número de classes para cada plano de informação, e quais os índices correspondentes aos centróides.

Assim, para o PI solos, oito classes foram definidas, correspondentes às oito classes de solos presentes no Mapa de Levantamento Semi-Detalhado de Solos da Quadricula de Araras (SP) (Oliveira *et al.*, 1982):

Classe 1: LR - Latossolo Roxo;

Classe 2: LE - Latossolo Vermelho Escuro;

Classe 3: LV - Latossolo Vermelho Amarelo;

Classe 4: PV - Podzólico Vermelho Amarelo;

Classe 5: TR - Terra Roxa Estruturada;

Classe 6: AQ - Areias Quartzosas Profundas;

Classe 7: Li - Solos Litólicos;

Classe 8: Hi - Solos Hidromórficos.

Uma classe adicional, classe 9, referiu-se às áreas dos principais municípios.

Os dados geológicos, proveniente do Mapa Geológico da Folha Campinas (IPT, 1993), resultaram em 12 classes no PI geologia:

Classe 1: Qa - Aluviões do Quaternário;

Classe 2: TQp - Formação Piraçununga;

Classe 3: TQr - Formação Rio Claro;

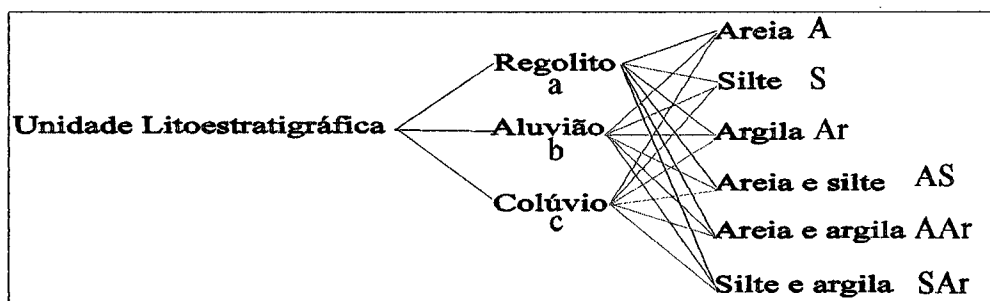
Classe 4: Sill - Soleiras diabásicas;

Classe 5: TRjp - Formação Pirambóia;

- Classe 6: Pc - Formação Corumbataí;
 Classe 7: Pi - Formação Irati;
 Classe 8: Ptt - Formação Tatuí;
 Classe 9: Cpa - Formação Aquidauana;
 Classe 10: Cpi + Cpa;
 Classe 11: TQi - Correlata à Formação Rio Claro;
 Classe 12: Cpi - Formação Itararé.

Os dados de formações superficiais, devido a sua complexidade de informações, foi previamente interpretado, de maneira a selecionar áreas com base no cruzamento dos dados litoestratigráficos, granulométricos e na característica do material intemperizado (colúvio, alúvio ou regolito), como mostrado esquematicamente na Figura 32:

FIGURA 32 - ESQUEMA DO CRUZAMENTO DOS DADOS DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS



Uma vez que este cruzamento gerou um número muito elevado de classes, optou-se pela separação em três planos de informação, os dados cruzados do mapa de formações superficiais de Leme, de Araras e de Rio Capetinga, os quais representam 2/3 da área de estudo.

As classes do PI referente a formações superficiais de Leme foram as seguintes:

- Classe 1 = 1bI - Quaternário, aluvião, granulometria indiferenciada;
 Classe 2 = 1a - Quaternário, regolito;
 Classe 3 = 1bAr - Quaternário, aluvião, granulometria argila;
 Classe 4 = 1bA - Quaternário, aluvião, granulometria areia;
 Classe 5 = 2bA - Formação Piraçununga, aluvião, granulometria areia;
 Classe 6 = 2bI - Formação Piraçununga, aluvião, granulometria indiferenciada;
 Classe 7 = 2a - Formação Piraçununga, regolito;

Classe 8 = 3aAr - Sills de diabásio, regolito, granulometria argila;
 Classe 9 = 3aSAr - Sills de diabásio, regolito, granulometria silte e argila;
 Classe 10 = 4aA - Formação Botucatu, regolito, granulometria areia;
 Classe 11 = 5aA - Formação Pirambóia, regolito, granulometria areia;
 Classe 12 = 6aA - Formação Corumbataí, regolito , granulometria areia;
 Classe 13 = 6aAr - Formação Corumbataí, regolito , granulometria argila;
 Classe 14 = 6aS - Formação Corumbataí, regolito , granulometria silte;
 Classe 15 = 6aI - Formação Corumbataí, regolito , granulometria indiferenciada;
 Classe 16 = 6a - Formação Corumbataí, regolito ;
 Classe 17 = 7aSAr - Formação Irati, regolito , granulometria silte e argila;
 Classe 18 = 7aAr - Formação Irati, regolito , granulometria argila;
 Classe 19 = 8bSAr - Formação Tatuí, aluvião, granulometria silte e argila;
 Classe 20 = 8aA - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia;
 Classe 21 = 8aAS - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia e silte;
 Classe 22 = 8bI - Formação Tatuí, aluvião, granulometria indiferenciada;
 Classe 23 = 8aAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria argila;
 Classe 24 = 8a - Formação Tatuí, regolito ;
 Classe 25 = Área urbana cartografada;
 Classe 26 = 8aSAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria silte e argila;
 Classe 27 = 1- Quaternário.

As classes pertencentes ao PI formação superficial de Araras, ficaram representadas por:

Classe 1 = 1bI - Quaternário, aluvião, granulometria indiferenciada;
 Classe 2 = 1bA - Quaternário, aluvião, granulometria areia;
 Classe 3 = 2cA - Formação Rio Claro, colúvio, granulometria areia;
 Classe 4 = 3aAr - Sills de diabásio, regolito , granulometria argila;
 Classe 5 = 3aAAR - Sills de diabásio, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 6 = 4aA - Formação Pirambóia, regolito , granulometria areia;
 Classe 7 = 5aAr - Formação Corumbataí, regolito , granulometria argila;
 Classe 8 = 5aAAR - Formação Corumbataí, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 9 = 6aAr - Formação Irati, regolito , granulometria argila;
 Classe 10 = 6aAAR - Formação Irati, regolito , granulometria areia e argila;

Classe 11 = 7aAAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 12 = 7aS - Formação Tatuí, regolito , granulometria silte;
 Classe 13 = 7aA - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia;
 Classe 14 = 7aAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria argila;
 Classe 15 = 7aAS - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia e silte;
 Classe 16 = 7cAAr - Formação Tatuí, colúvio, granulometria areia e argila;
 Classe 17 = 8aAr - Formação Itararé, regolito , granulometria argila;
 Classe 18 = 8aS - Formação Itararé, regolito , granulometria silte;
 Classe 19 = 2'cA - Formação Piraçununga, colúvio, granulometria areia;
 Classe 20 = 2'aAAr - Formação Piraçununga, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 21 = 2'cAAr - Formação Piraçununga, colúvio, granulometria areia e argila;
 Classe 22 = Área urbana cartografada.

Para o PI formações superficiais de Rio Capetinga, foram estabelecidas as seguintes classes:

Classe 1 = 1bI - Quaternário, aluvião, granulometria indiferenciada;
 Classe 2 = 1bA - Quaternário, aluvião, granulometria areia;
 Classe 3 = 1bAr - Quaternário, aluvião, granulometria argila;
 Classe 4 = 2bAAr - Formação Piraçununga, aluvião, granulometria areia e argila;
 Classe 5 = 2bA - Formação Piraçununga, aluvião, granulometria areia;
 Classe 6 = 2aA - Formação Piraçununga, regolito , granulometria areia;
 Classe 7 = 3aAAr - Sills de diabásio, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 8 = 3aAr- Sills de diabásio, regolito , granulometria argila;
 Classe 9 = 4aA - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia;
 Classe 10 = 4aAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria argila;
 Classe 11 = 5aAr - Formação Itararé, regolito , granulometria argila;
 Classe 12 = 5aS - Formação Itararé, regolito , granulometria silte;
 Classe 13 = 5aA - Formação Itararé, regolito , granulometria areia;
 Classe 14 = 5aSAr - Formação Itararé, regolito , granulometria silte e argila;
 Classe 15 = 5aAS - Formação Itararé, regolito , granulometria areia e silte;
 Classe 16 = 5aAAr - Formação Itararé, regolito , granulometria areia e argila;
 Classe 17 = 4aAAr - Formação Tatuí, regolito , granulometria areia e argila;

O Plano de informação referente ao uso do solo, obtido frente a digitalização do mapa interpretado a partir da banda 5 da imagem de satélite TM Landsat, fornecido pelo IPT (1993), em escala 1:250.000, resultou nas seguintes classes:

Classe 1 = Floresta;

Classe 2 = Vegetação secundária de porte arbóreo;

Classe 3 = Reflorestamento;

Classe 4 = Capoeira/cobertura residual;

Classe 5 = Cultura perene;

Classe 6 = Cana-de-açúcar;

Classe 7 = Pasto sujo/macega;

Classe 8 = Pastagem;

Classe 9 = Cultura temporária;

Classe 10 = Espelho d'água;

Classe 11 = Área urbanizada;

Classe 12 = Indeterminado.

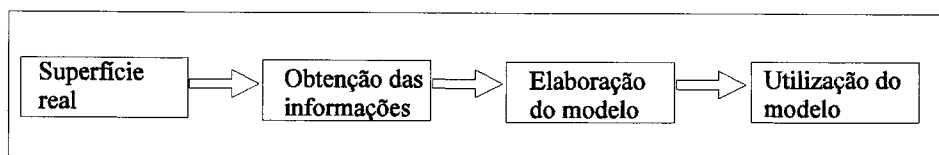
A utilização de modelos matemáticos que reproduzam o comportamento da superfície terrestre, é um pré-requisito às soluções dos problemas que necessitam de informações sobre o relevo (Mitishita, 1994).

Modelo Digital do Terreno (MDT), é um termo genérico empregado para referir-se a modelamento matemático de superfícies. Pode ser definido como sendo um conjunto de pontos com coordenadas espaciais (X,Y,Z) conhecidas num dado referencial e algoritmos que permitam construir um modelo matemático que reproduza da melhor maneira possível o comportamento da superfície real (Ostman 1987 *apud* Mitishita 1994).

Conforme Pettinati (1983 *apud* Mitishita 1994), o processo de modelagem de superfícies (Figura 33), envolve três etapas básicas de trabalho:

- obtenção de informações da superfície real que possibilitem a caracterização matemática do modelo;
- elaboração de um modelo matemático, composto de estruturas de dados e funções de interpolação que simulem o comportamento da superfície real;
- utilização do modelo em substituição à superfície real.

FIGURA 33 - PROCESSO DE MODELAMENTO DE SUPERFÍCIES



Modificado de Mitishita (1994)

A aquisição das informações das curvas de nível das cartas topográficas em escala 1:50.000 (IBGE), das folhas de Araras, Leme, Conchal e Rio Capetinga, espaçadas em 20 metros, foram obtidas através de recursos de computação gráfica (CAD). Como anteriormente mencionado, digitalizou-se manualmente todas as curvas, atribuindo-se o valor Z correspondente ao valor altimétrico de cada curva representadas nas cartas.

Estes dados, como um plano de informação no SGI/SITIM, passaram por uma etapa de organização de pontos. Ou seja, a área deste PI foi dividida em células (partições), onde cada célula continha um certo número máximo de pontos (41 pontos ou amostras/célula ou partição).

Esta fase anterior, agilizou a etapa seguinte, a geração da grade regular. A malha regular é um modelo digital que aproxima a superfície real através de um poliedro de faces retangulares (Mitishita, 1994). Os vértices dos retângulos podem ser os próprios pontos amostrados por perfilagem regular ou obtidos por interpolação.

O SGI/SITIM, cria uma grade retangular regularmente espaçada de pontos a partir de um conjunto de amostras. O valor da cota de cada ponto da grade é estimado a partir da interpolação de um certo número de vizinhos mais próximos deste ponto.

Para se gerar o formato imagem deste PI ativo, esta grade passou por um processo de refinamento, ou seja, a imagem foi obtida através de um algoritmo de interpolação bilinear aplicado sobre a grade regular. Fornecidas as coordenadas UTM ($x_0 = 242000$; $x_1 = 293990$; $y_0 = 7510000$; $y_1 = 7564990$), a resolução vertical e horizontal da imagem de saída (30 x 30) e o tipo de interpolação, o SGI calculou inicialmente os valores de cota máximos e mínimos para a janela definida para a imagem, e posteriormente executou a interpolação.

7.2.3 Processamento Digital de Imagens

Processamento de imagens digitais pode ser entendido como o conjunto de procedimentos relativos à manipulação e análise de imagens através de computador (Quintanilha, 1990).

É um conjunto de técnicas que tem como objetivos principais, remover os vários tipos de degradações e distorções inerentes aos processos de aquisição, transmissão e visualização das imagens coletadas, facilitando a extração das informações.

Dentre as técnicas de processamento digital de imagens utilizadas na presente pesquisa, foram utilizadas as de filtragem, de combinação, de fusão e classificação não supervisionada, as quais serão descritas a seguir. Maiores informações das técnicas, podem ser encontradas em Crósta (1993).

7.2.3.1 Filtragem

Numa imagem digital, gradientes de níveis de cinza no limite entre duas áreas representam as diferentes respostas da energia eletromagnética. Variações suaves dos gradientes, caracterizam as feições de baixa frequência. São limites gradacionais, que variam mais uniformemente e consequentemente são menos nítidos. Como exemplos, pode-se citar áreas monotonamente uniformes em imagens, como áreas de monocultura em terrenos planos.

Mudanças bruscas dos gradientes constituem as feições de alta frequência, como limites entre diferentes coberturas de solo, entre diferentes tipos de vegetação, estruturas geológicas (como falhas e fraturas). Estes limites também são conhecidos como bordas e ocupam áreas pequenas na imagem.

A filtragem espacial é uma técnica de processamento digital usada para realçar ou suavizar a existência de gradientes de níveis de cinza no limite entre áreas diferentes.

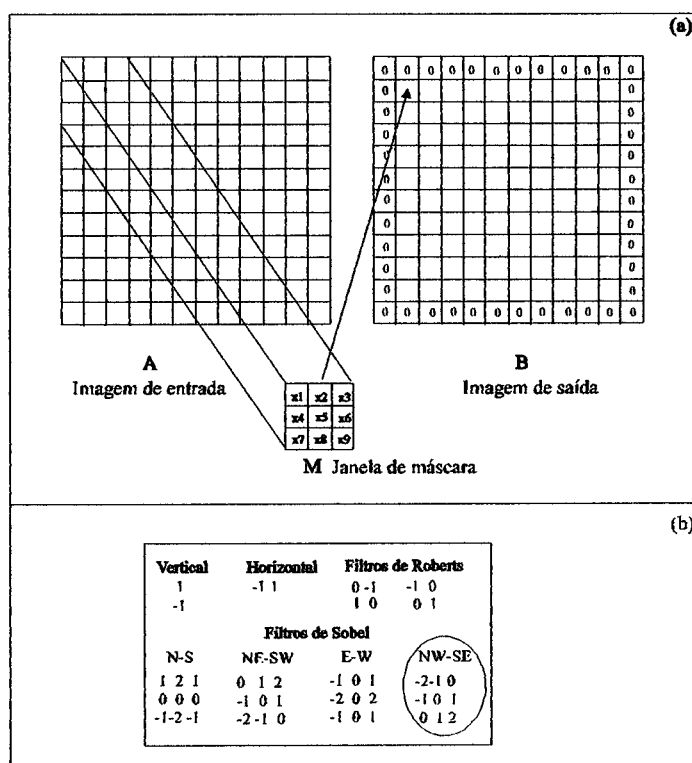
Uma imagem digital é uma representação numérica na forma matricial, onde cada pixel tem determinado valor (DN) que representa a sua localização e o seu nível de cinza. A Figura 34a mostra esquematicamente uma imagem A, onde cada pixel tem seu próprio valor de DN. Esta imagem é submetida a uma filtragem através de uma janela M de dimensões 3x3, com valores das celas pré-definidos. Ao posicionar esta janela no canto superior esquerdo da imagem, multiplica-se cada DN da janela com os respectivos DN da imagem. A somatória destes nove valores, será o novo valor do pixel correspondente da imagem de saída B (imagem

filtrada), que estará alocado na segunda linha e segunda coluna. A janela move-se ao longo da linha para se obter o pixel correspondente ao da segunda linha e terceira coluna da imagem de saída. É uma operação feita pixel a pixel para toda a imagem, calculando-se o novo valor do pixel em função dos oito vizinhos mais próximos, pois no exemplo a janela ou máscara era uma matriz de 3x3. Observa-se também que as bordas da imagem de saída ficam com valores iguais a zero.

Os tipos básicos de filtros de convolução são os filtros passa-baixa, que eliminam as informações de altas frequências de uma imagem; filtros passa-alta, que eliminam as feições de baixa frequência deixando as de alta frequência, normalmente expressas por bordas ou limites entre áreas de diferentes valores de DN; filtros direcionais, que são um tipo de filtro passa-alta, realçam as bordas em direções pré-determinadas.

Os pesos dos filtros direcionais estão distribuídos assimetricamente ao redor de um eixo hipotético. As direções a serem realçadas são paralelas à esse eixo hipotético, onde o realce se dá num intervalo de 45° para ambos os lados em relação à direção do realce. Exemplos de filtros direcionais são mostrados a seguir, na Figura 34b.

FIGURA 34 - ESQUEMA JANELA MÓVEL PARA FILTRAGEM (a) E TIPOS DE FILTROS DIRECIONAIS (b)



Modificado de Crósta (1993)

O Filtro de Sobel NW-SE, assinalado na Figura 34b, foi o aplicado sobre o MNT, com o objetivo de realçar as bordas na direção NE-SW, facilitando uma melhor visualização, sobretudo quando da adição de *layers* como rede de drenagem e áreas anômalas.

7.2.3.2 Composição Colorida

Um meio de se extrair informações pela combinação de três canais geofísicos em uma única imagem, pode ser feito através da composição colorida.

A alocação dos canais do K, do U e do Th, no canal do R (vermelho), G (verde) e B (azul), pode mostrar as coincidências de altos valores anômalos. Assim, pela teoria básica das cores, a combinação do vermelho com o verde resulta na cor amarela; a combinação do vermelho com o azul na cor magenta; azul com verde na cor *cyan*.

Cabe ressaltar que antes de realizar a composição colorida, os dados aerogamaespectrométricos de K, U e Th foram transformados em imagens monocromáticas de 8 bits cada, onde o espectro de valores dos dados foi convertido para o intervalo de 256 níveis de cinza. Esta transformação representa uma compressão da resolução original das variáveis geofísicas, a qual deve ser levada em consideração.

Composições coloridas também foram realizada com as bandas 3, 4 e 5 da imagem do Landsat_TM.

7.2.3.3 IHS

Um sistema de representação de cores alternativo ao RGB, é o sistema IHS. As cores são definidas por três atributos, onde a matiz (H) define a cor do objeto, a saturação (S) expressa a sua pureza e a intensidade (I) define o brilho.

De acordo com Crósta (1993), a matiz do objeto é a medida do comprimento de onda médio da luz que ela reflete ou emite, definindo portanto a cor do objeto. A intensidade é a medida total envolvida em todos os comprimentos de onda, fornecendo a sensação de brilho. A saturação expressa o intervalo de comprimentos de onda ao redor do comprimento de onda médio no qual a energia é refletida ou transmitida.

A transformação IHS pode eliminar a correlação entre as imagens TM, proporcionando um melhor contraste do produto final. Entende-se como correlação a repetição da informação espectral de uma banda para a outra. Por exemplo, se dois canais, estivessem perfeitamente

correlacionados, eles descreveriam essencialmente a mesma informação. Sendo, portanto, portadores ineficientes de informação.

Segundo Gisllespie *et al.* (1986 *apud* Bicho 1994), a decorrelação IHS é implementada fazendo-se inicialmente a transformação do espaço RGB para o IHS. Nesta etapa, toda a informação de intensidade do triplete ficará concentrada no canal I, enquanto que as informações de matiz e saturação estarão situadas nos canais H e S, respectivamente. Pelo fato dessas variáveis serem independentes, o aumento de contraste individual das imagens I, H, S permite que o espaço de cores seja melhor utilizado. Após o aumento de contraste, faz-se a transformação inversa IHS-RGB. Esta técnica deve ser limitada à integração de dois conjuntos de dados: um no canal do I e outro no canal do H, pois a visão humana diferencia bem as mudanças de intensidade e de cor, enquanto a variação de saturação não é facilmente percebida. Harding & Forrest (1988 *apud* Bicho 1994) sugerem a atribuição de dados com altas resoluções ao canal do I, geoquímicos e geofísicos ao canal do H e imagens com valores constantes ao S.

Para combinar a informação aerogeofísica de K, U e Th com a informação textural da área, na presente Dissertação, utilizou-se a transformação IHS-RGB. Inicialmente realizou-se a transformação RGB-IHS com as variáveis geofísicas de K, U e Th, selecionando-se a componente que informasse a cor (H). Na transformação inversa (IHS-RGB), alocou-se na componente I a banda 5 da imagem TM; na componente H a imagem H obtida da transformação IHS com as imagens gama; e na componente S uma imagem com DN = 128.

7.2.3.4 Classificação

Técnicas de classificação multiespectral foram aplicadas na imagem gama oriunda da composição colorida (RGB - KUTH, respectivamente) para se distinguir e identificar algumas regiões de ocorrência das anomalias, por meio da classificação não supervisionada.

A classificação não supervisionada refere-se à extração dos padrões de resposta espectral dominantes (assinaturas) que ocorrem numa imagem e sua identificação por meio de veracidade no terreno (Eastman, 1994). No *Idrisi for Windows* a classificação não supervisionada é efetuada através do módulo denominado *CLUSTER* (grupo).

O *CLUSTER* trabalha com imagens compostas a partir de três canais, produzidas pelo módulo *COMPOSIT* e usa uma técnica de seleção através do pico do histograma.

Na composição colorida da imagem gama (KUTh), efetuou-se a operação *CLUSTER* escolhendo-se a opção de deixar os grupos menos significativos e realizar uma classificação mais restrita (opção *fine*), para gerar um número maior de grupos, de acordo com Souza *et al.* (1997b).

Após a identificação dos *CLUSTERS* de interesse, a imagem obtida foi reclassificada pelo módulo *RECLASS*, o qual reclassifica os dados armazenados nas imagens pela pré-definição dos valores. Selecionou-se os *CLUSTERS* correspondentes valores elevados e coincidentes de K e Th, bem como valores elevados e coincidentes de K, U e Th da imagem classificada. Este módulo *RECLASS* também foi usado para se identificar áreas anômalas de cada variável geofísica separadamente.

7.2.4 Integração dos Dados

A integração dos dados baseou-se em operações aritméticas dos dados georeferenciados, de mesmo tamanho, com mesmo número de linhas e colunas e iguais resoluções verticais e horizontais. A integração, também envolveu a adição de *layers* (aqui planos de informações vetoriais, como rede de drenagem, limites das áreas anômalas), sobre algumas imagens.

A integração dos dados geológicos, pedológicos, aerogamaespectrométricos, topográficos, de formações superficiais, de imagens de satélite, foram realizados no Idrisi *for Windows*.

Layers de classes selecionadas dos dados geológicos e pedológicos foram adicionados a imagens de satélite. Estas mesmas classes sofreram tabulação cruzada, onde a área de coincidência, como uma imagem booleana foi multiplicada com o *cluster* coincidência de elevados valores de KUTh, selecionados e obtidos da classificação não supervisionada da composição colorida RGB do KUTh. Também realizou-se a superimposição do *layer* Aluviões do Quaternário oriundo do mapa geológico ao *cluster* elevados valores de K e Th que percorriam as margens do Rio Moji.

As imagens das classes anômalas (valores de cps superiores a de $X + 3s$) do K, do U e do Th, foram multiplicadas com imagem de solos, bem como a superimposição do *layer* referente ao urânio e ao potássio, sobre o modelo de elevação digital do terreno.

Das classes selecionadas de acordo com a granulometria (argila e silte, argila) das formações geológicas de superfície da região de Leme, realizou-se multiplicação com a imagem de 8 bits do urânio.

Uma técnica de *display* em perspectiva, mostrou a situação do relevo proveniente do MDT associada às imagens gama, através do módulo *ORTHO* do *Idrisi for Windows*.

A consistência dos dados gamaespectrométricos terrestres de Ct, K, U e Th pôde ser verificada quando comparou-se os perfis terrestres com os dados digitais aerogamaespectrométricos correspondentes. No Geosoft, a partir do perfil terrestre, extraiu-se do arquivo digital aéreo um perfil passando pelos mesmos pontos. Obteve-se assim um arquivo XYZ para cada variável geofísica aérea, o qual foi integrado aos dados de superfície.

7.3 Análises Químicas

7.3.1 Digestão Total do Solo com Ácido Fluorídrico (HF) e Ácido Perclórico (HClO₄)

A análise da digestão total do solo das 24 (vinte e quatro) amostras foi realizada no Laboratório de Nutrição de Plantas, do Departamento de Solos, Setor de Ciências Agrárias da UFPR, com o objetivo de medir o conteúdo total dos seguintes elementos: P, Ca, Mg, Fe e Al, conforme metodologia proposta por Jackson (1958). Segundo este autor, a digestão com HF-HClO₄ destrói os silicatos. O SiO₂ muda para SiF₄ e os cátions metálicos ficam retidos no cadinho, como sais de fácil dissolução. O Anexo I apresenta o laudo final da análises realizadas.

7.3.2 Análise Química de Rotina dos Solos

A análise química de rotina é um dos meios utilizados para avaliar a fertilidade do solo, indicando a disponibilidade dos elementos essenciais como Ca, Mg, K, P, etc., e tóxicos para as plantas, como o alumínio, diferindo da análise anteriormente citada, que expressa os teores totais no solo destes elementos.

A análise química de rotina realizada em amostras de solo da presente pesquisa, foi realizada no Laboratório de Análise Química de Rotina do Departamento de Solos, Setor de Ciências Agrárias, UFPR. Os resultados são mostrados no Anexo II. O método utilizado, pode

ser consultado através do Manual de Análise Química de Solo e Controle de Qualidade (Pavan *et al.*, 1992).

7.3.3 Análise Física dos Solos

A análise granulométrica das amostras de solo (Anexo III), foram realizadas no Laboratório de Análise Física de Solos, Departamento de Solos, Setor de Ciências Agrárias da UFPR. O método utilizado, Dispersão Total - Método do Densímetro, é mostrado em EMBRAPA (1979).

7.3.4 Análise Radioquímica

Para a determinação do urânio natural, do U^{238} e do tório natural em amostras de solos e fertilizantes, utilizou-se o método fluorimétrico para o urânio e o espectrofotométrico, para o tório (Anexo IV).

As referidas análises, foram realizadas no Laboratório do Serviço de Proteção Radiológica (SPR) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

7.4 Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo, envolveram o reconhecimento da área, a gamaespectrometria terrestre, visitas a usinas de cana-de-açúcar, amostragem de solos em pontos inseridos ou não em áreas anômalas, bem como a medição da susceptibilidade magnética de alguns solos e rochas através de um indicador de susceptibilidade.

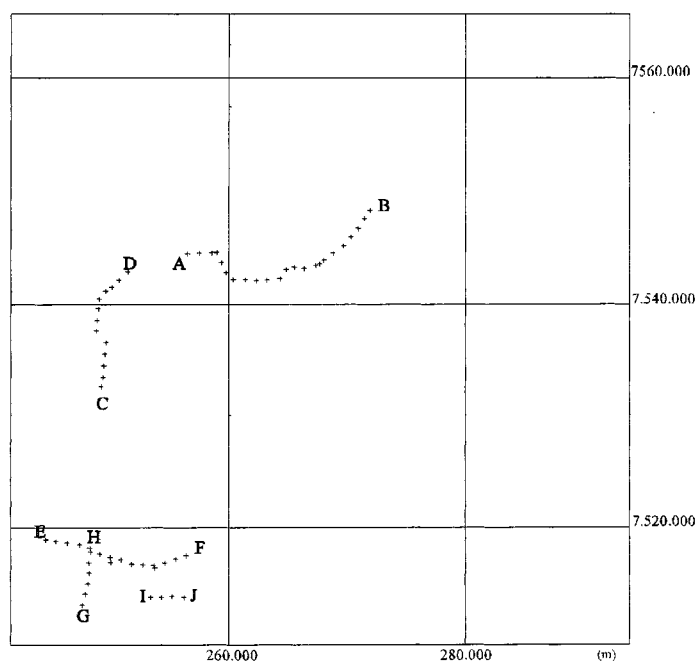
A gamaespectrometria terrestre, para a detecção do K, do U, do Th e da contagem total com tempo de integração de 10 segundos foi realizada em seções com leituras dos pontos espaçados em aproximadamente em 1 km (Figura 35).

7.4.1 Materiais e Equipamentos

Foram os seguintes materiais e equipamentos utilizados na fase de campo: cartas topográficas; mapa rodoviário; mapa de solos; mapa aerogeofísico das anomalias; trados

holandês e alemão; pedocomparador; carta de Munsel; indicador de susceptibilidade; gamaespectrômetro; bússola e GPS Garmin 45.

FIGURA 35 - PERFIS
GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES
E DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA



As medidas gamaespectrométricas (K, U, Th e contagem total) foram tomadas com tempo de integração de 10 s. O instrumento utilizado foi o GRS-500 Differential GammaRay Spectrometer/Scintillometer, da Scintrex. O susceptibilímetro usado foi o Kappameter KT-45 da Geopyzika. As razões de amostragem ou tempo de integração deste instrumento são de 1 e 20 s.

O GRS-500 possui um cristal de NaI (Tl) com volume de 124 cm³. As janelas de energia são:

Tc1: contagem total acima de 0,08 MeV;

Tc2: contagem total acima de 0,40 MeV;

K: todas as radiações gama entre 1,35 e 1,59 MeV;

U: todas as radiações gama entre 1,65 e 1,87 MeV;

Th: todas as radiações gama entre 2,45 e 2,79 MeV.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

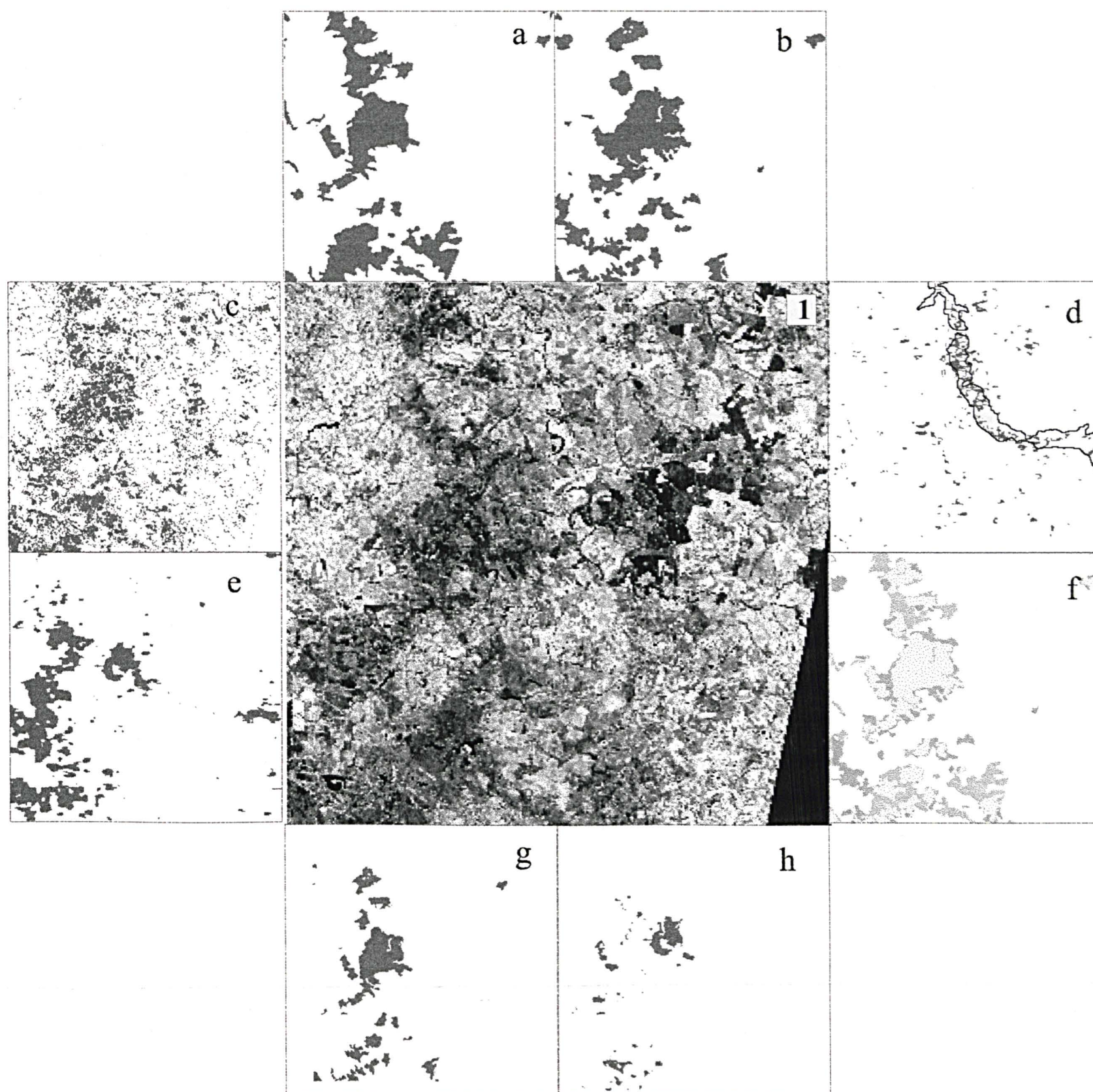
8.1 Geoprocessamento

A Figura 36 mostra a banda 5 da imagem TM e os *layers sills* de diabásio (a) e Latossolo Roxo (b) da Quadricula de Araras (SP). Observa-se a coincidência destes planos de informação com a resposta da imagem de satélite. A Figura 36c, mostra o *cluster* referente às soleiras diabásicas, resultado da classificação não supervisionada da composição colorida RGB das bandas 3, 5 e 4 da imagem Landsat/TM.

Este procedimento foi realizado uma vez que Ferreira (1991) observou que anomalias aerogamaespectrométricas ocorriam em soleiras diabásicas. Assim, esta relação (soleiras diabásio x Latossolos Roxos x anomalias aerogamaespectrométricas) despertou a necessidade de investigar qual a atividade agrícola realizada sobre estes solos, visto que levantamentos aerogamaespectrométricos detectam a radiação gama proveniente dos primeiros 30 cm do solo.

Os dados de uso de solo, bem como as visitas a campo e a usinas, revelaram que a principal atividade agrícola realizada sobre esta classe de solos é o cultivo, por várias décadas, de cana-de-açúcar. Considerando que tal cultura praticamente é de abastecimento externo, a mesma é tratada com doses elevadas de fertilizantes, principalmente dos tipos fosfatados. As doses de fertilizantes aplicadas dependem do sistema de cultivo desta cultura. Assim, quantidades maiores de fosfatos são aplicadas no sistema cana-planta, que é um sistema implantado geralmente em 20% da área que está sendo cultivada. Neste tipo de cultivo são aplicados 700 kg/alq de formulações N-P-K 4-20-20 ou 5-25-25. Em algumas áreas, adicionalmente, aplicam-se 200 kg/alq de superfosfatos. Quando o sistema de produção é do tipo cana-soca (“rebrote”), utilizam-se formulações com baixas concentrações de P e elevadas de N e K, como 14-07-28, 18-00-36, 20-05-20.

FIGURA 36 - INTEGRAÇÃO DAS VARIÁVEIS ESPACIAIS



Legenda:

1 - Banda 5 TM/LANDSAT

a - *Sills* de diabásio (mapa geológico)

b - Latossolo Roxo (mapa de solos)

c - Cluster *sill* de diabásio (da classificação não supervisionada da composição RGB das bandas 5, 4 e 3)

d - Coincidência e elevadas contagens de K e Th (da classificação da imagem gama) superimposta ao *layer* Qa (aluviões do Quaternario do mapa geológico)

e - Cluster das elevadas contagens de K, U e Th (da classificação da composição colorida da imagem gama)

f - Tabulação cruzada das imagens booleanas referentes às classes *sills* de diabásio e Latossolo Roxo

g - Coincidência dos *sills* de diabásio e Latossolos Roxos

h - Interposição das elevadas contagens de K, U and Th; *sills* de diabásio e Latossolo Roxo

A presença de radionuclídeos em fertilizantes fosfatados (Capítulo 4); a variação dos teores de radionuclídeos conforme processo de produção (Pfister *et al.*, 1976; Guimond, 1978) e a origem da matéria-prima (Pfister *et al.*, 1976; Menzel, 1968); a utilização de fontes fosfatadas nacionais e importadas; o comportamento geoquímico dos radionuclídeos frente aos processos pedogenéticos (Wilford *et al.*, 1997), aliados a um histórico de uso intensivo de fertilizantes nestas áreas de cana-de-açúcar, levou a necessidade de selecionar áreas ou regiões consideradas geofisicamente anômalas e integrá-las aos dados digitais de geologia (para mostrar que o material de origem era uma rocha básica, sobre a qual a literatura revelava teores baixos de radionuclídeos), de solos (Latosolos Roxos são solos profundos, bem intemperizados, provenientes da alteração de rochas básicas e com elevados teores de Fe_2O_3), relevo (para referenciar a situação de relevo em que se encontravam as anomalias e os solos), formações superficiais (para revelar se estas anomalias ocorriam sobre colúvios, alúvios ou material *in situ*, bem como a influência da granulometria argilosa).

A composição colorida RGB de K, U e Th, como verificado na Figura 37, mostra que a coloração magenta representa os teores elevados e coincidentes de K e Th.

A classificação não supervisionada desta composição colorida (Figura 38a), permitiu a seleção do *cluster* correspondente a estes valores elevados e coincidentes de radionuclídeos, sobre o qual foi adicionado o *layer* Aluviões do Quaternário (Figura 38b), oriundo do mapa geológico.

FIGURA 37 - COMPOSIÇÃO COLORIDA R (K), G (U) e

B (Th)

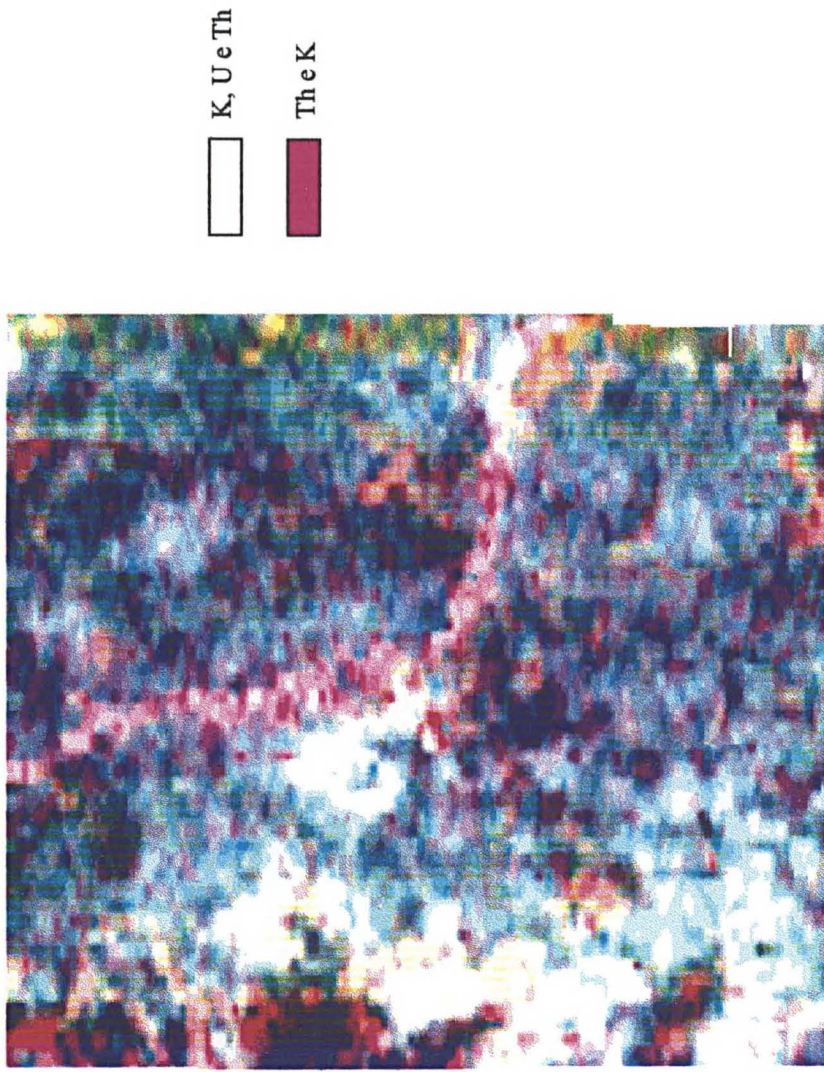
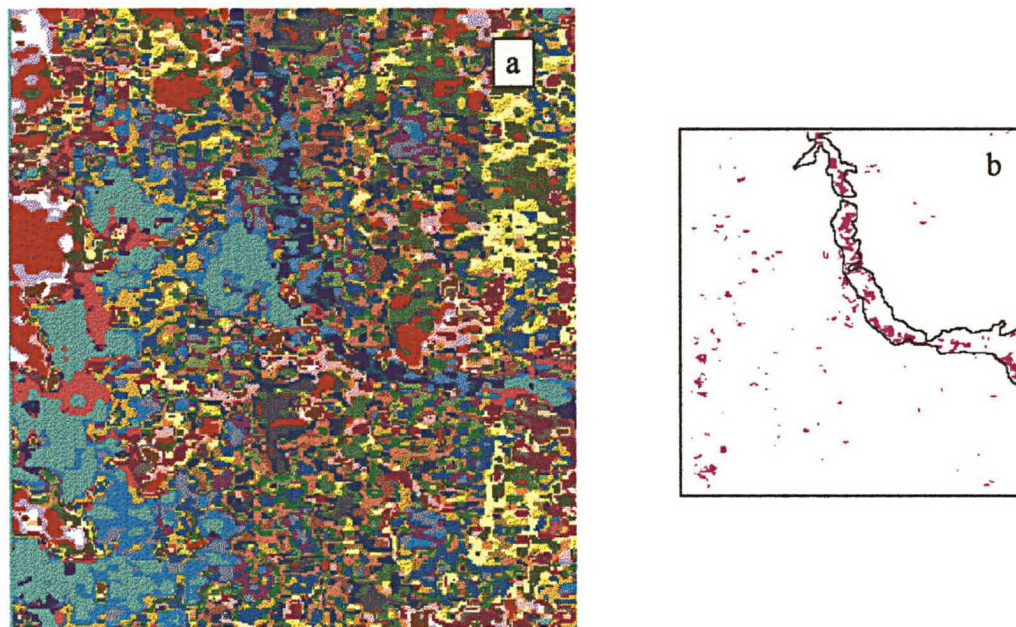


FIGURA 38 - *CLUSTERS* DA COMPOSIÇÃO COLORIDA (a) E *LAYER* ALUVIÕES DO QUATERNÁRIO ADICIONADO AO *CLUSTER* K E Th (b)



Observa-se na imagem do MDT (Figura 39), que os níveis de cinza escuros referem-se as porções mais baixas do terreno. Sobre esta imagem filtrada, adicionou-se o *layer* rede de drenagens (Figura 40). O MDT em perspectiva (Figura 41), mostra acentuadamente a planície aluvionar do Rio Moji-Guaçu, onde se encontram os referidos aluviões anômalos.

Ao longo das margens do Rio Moji-Guaçu, segundo o levantamento pedológico da Quadricula Araras (Oliveira *et al.*, 1982), encontra-se uma associação de três classes de solos: Latossolos Vermelhos-Amarelos (Unidade Campininha LV-6), Solos Hidromórficos (Hi) e Cambissolos (Cb-2).

A unidade Campininha, refere-se a um Latossolo Vermelho-Amarelo câmbico que ocorre em relevo aplainado de terraço. Os solos dessa unidade se desenvolvem em material aluvionar de antigos terraços situados ao longo das margens do Rio Moji-Guaçu em cotas suficientemente elevadas para ficarem atualmente a salvo de adições fluviais. As principais culturas são cana-de-açúcar e *Citrus*. Estes solos apresentam teores médios de argila e uma capacidade de troca catiônica mais elevada que os outros Latossolos de textura semelhante, devido a maior contribuição da fração orgânica. Segundo Peres *et al.* (1980 *apud* Oliveira *et al.* 1982), uma amostra composta de Latossolo câmbico coletado nessa quadricula apresentou 93% de quartzo, 0,7% de mica e 1,7% de feldspato. Oliveira *et al.* (1982), em quatro amostras analisadas, obtiveram uma variação de 1 a 3% de feldspatos e as micas não ultrapassaram 4%. A unidade Sete Lagoas (Cb-2), refere-se a um Cambissolo Álico com presença marcante de mica, especialmente a partir do horizonte B1. Esses solos situam-se ao longo das margens do Rio Moji-Guaçu, relacionados ao nível I dos antigos terraços, segundo Peres *et al.* (1980 *apud* Oliveira *et al.* 1982). Os solos hidromórficos desta quadricula, por se desenvolverem em planícies aluvionares onde a ocorrência de estratos é comum, apresentaram diversidade textural bastante acentuada, tendo-se verificado a ocorrência de solos com texturas desde arenosa abaixo da camada orgânica, até argilosa.

FIGURA 39 - MODELO DIGITAL DO
TERRENO (MDT)

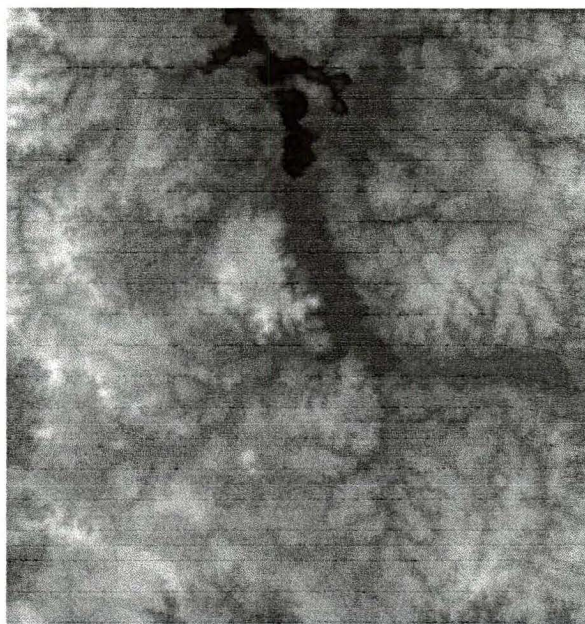
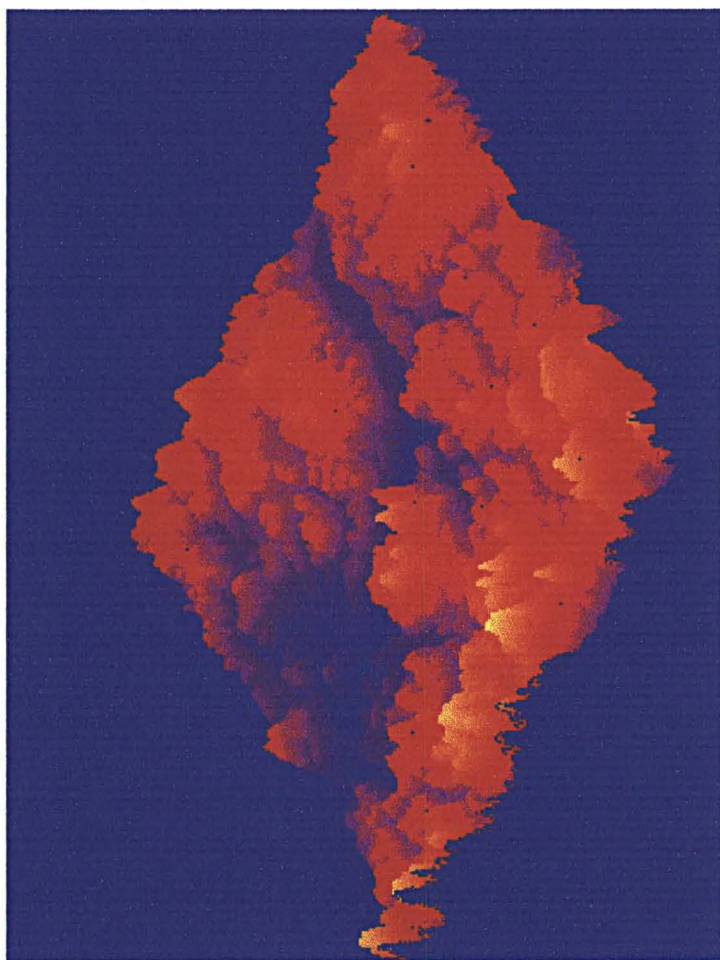


FIGURA 40 - MDT FILTRADO COM
LAYER DRENAGEM



FIGURA 41 - MODELO DIGITAL DO TERRENO EM PERSPECTIVA



Conforme mencionado no capítulo 3, Wilford *et al.* (1997) verificaram que as respostas dos raios gama em regimes deposicionais intensos (mais recentes), refletem a geoquímica e a mineralogia da rocha mãe dos quais os sedimentos foram derivados. Contrariamente as respostas dos raios gama em sistemas deposicionais menos ativos (mais estáveis), refletem processos relacionados ao intemperismo.

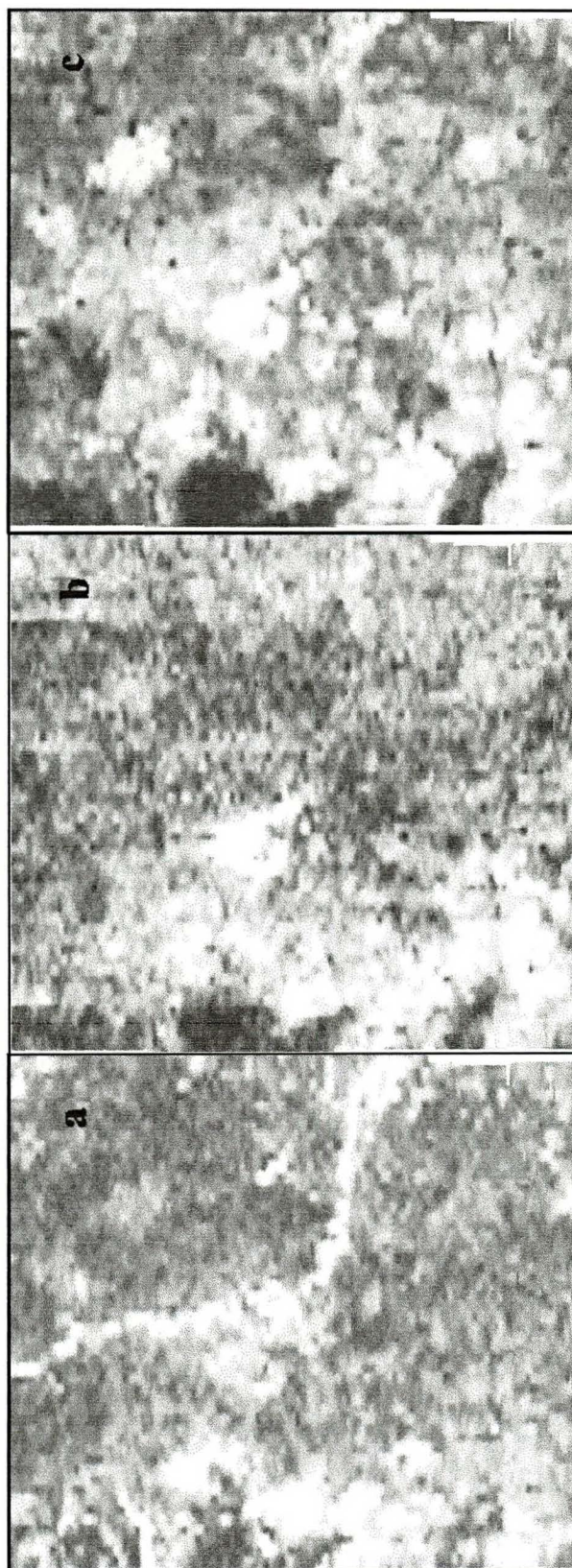
No caso da presente Dissertação, os terraços são antigos e apesar do material não ser oriundo de fontes graníticas ou metamórficas como a área estudada por Wilford *et al.* (1997), elevados valores de K foram observados (Figura 43). É possível uma concentração de material micáceo oriundo do embasamento. Segundo os autores mencionados, o potássio é geoquimicamente móvel e solúvel na maioria das condições de intemperismo. Durante tais processos o K é despreendido de minerais primários, como os feldspatos potássicos e micas e adsorvido em minerais de argila, como a ilita, montmorilonita e em menores proporções na caulinita. Sugere-se, portanto, que a ocorrência desta anomalia de K nestes terraços seja oriunda do transporte deste radionuclídeo (elevada atividade deposicional), proveniente da fertilização potássica das porções mais elevadas do terreno, bem como da contribuição do potássio presente nos feldspatos e micas dos solos drenados pelo rio Moji-Guaçu.

A ocorrência de anomalias de tório ao longo do curso do rio Moji-Guaçu, obtida pela classificação não supervisionada da composição colorida RGB-KUTh, pode ser explicada pela relação deste radionuclídeo com materiais orgânicos. Como mencionado, a elevada capacidade de troca de cátions dos LV-6 devido a fração orgânica e a ocorrência de solos hidromórficos em áreas mal drenadas das planícies aluvionares, pode explicar a permanência deste radionuclídeo nestas regiões de Latossolos, sobre as quais cultiva-se a cana-de-açúcar. Entretanto, no ciclo de interações do tório, mostrado na Figura 11 do Capítulo 3, observa-se que a mobilidade do Th também pode ocorrer na forma de complexos e colóides, como nos casos de complexos solúveis de sulfatos, nitratos, carbonatos, fosfatos, silicatos, orgânicos, etc., que permitem ao tório certa solubilidade e mobilidade em condições naturais. O Th pode também ser transportado quando adsorvido em colóides argilosos e óxidos de ferro, podendo neste caso ser transportado das porções mais elevadas, onde ocorrem os Latossolos Roxos intensivamente fertilizados. Entretanto, Boyle (1982) citou que durante o desenvolvimento dos solos, quantidades consideráveis de urânio são lixiviadas pelo intemperismo, quando comparadas com o tório, aumentando portanto a razão Th/U em relação a rocha fonte. Ao observar-se a imagem de 8 bits do U e do Th da Figura 42, verifica-se que valores elevados de Th (tons de cinza claros) percorrem as margens do referido rio. Se o urânio, de acordo com

Boyle (1982), apresenta uma vulnerabilidade maior a lixiviação quando comparado ao tório, por quê então o Th estaria naquelas porções onde se encontram os aluviões e não o U? Uma das hipóteses seria que o referido levantamento aerogeofísico informou a contribuição de Th proveniente de fertilizantes fosfatados de origem ígnea nos solos sob cultura de cana-de-açúcar daquela porção.

A classificação não supervisionada da composição colorida RGB, também selecionou áreas representativas da coincidência de elevados valores de K, U e Th (cor branca na Figura 37) ou tons de cinza claros mostrados na Figura 42, relacionada às imagens de 8 bits do K, do U e do Th). Este *cluster*, como uma imagem booleana (Figura 36e), foi multiplicado com a imagem selecionada da área de coincidência de Latossolos Roxos e *sills* de diabásio (Figura 36f), resultando na integração do *cluster* geofísico (K, U e Th) com a classe de solo LR e soleiras de diabásio (Figura 36h).

FIGURA 42 - IMAGENS DE 8 BITS DO K (a), DO U (b) E DO Th (c)



Os dados aerogamaespectrométricos originais foram classificados no *Idrisi for Windows*, de acordo com critérios de Saunders & Potts (1976). Para cada variável, obteve-se a média (X) e o desvio padrão (s), estabelecendo-se os fatores de significância, ou seja, múltiplos do desvio padrão acima e abaixo da média. A Tabela 32, mostra estes valores em contagens por segundo (cps). Atribuiu-se valores de 1 a 5 para os intervalos de contagens por segundo, obtendo-se assim 5 (cinco) classes correspondentes a: $n < X$; $X \leq n < X + 1s$; $X + 1s \leq n < X + 2s$; $X + 2s \leq n < X + 3s$; $n \geq X + 3s$. A Figura 43, mostra os dados aerogamaespectrométricos reclassificados.

TABELA 32 - MÚLTIPLOS DA MÉDIA E DO DESVIO PADRÃO DE K, U E Th (CPS)

Variável	Média (X)	Desvio (s)	$X + 1s$	$X + 2s$	$X + 3s$
Potássio	25	17	42	59	76
Urânio	17	8,5	25,5	34	42,5
Tório	55	26	81	107	133

Imagens booleanas das anomalias reclassificadas de K, U e Th, referentes a valores superiores a $X + 3s$ da Figura 43, também foram realizadas. Assim, procedeu-se operações de multiplicação com a imagem de solos, para se verificar em quais deles predominavam anomalias geofísicas. O resultado, como mostrado na Figura 44, revela que as ocorrências anômalas de urânio e de tório realmente predominam sobre os latossolos roxos (44b e 44c).

A Figura 45 mostra as anomalias de urânio em correspondência às porções mais elevadas do terreno, enquanto as de potássio dispõem-se predominantemente, sobre a planície aluvionar do rio Moji-Guaçu.

A Figura 46, mostra as imagens aerogamaespectrométricas do K (a), do U (b) e do Th (c) integradas à informação de relevo. As colorações verdes, indicam elevados valores das variáveis geofísicas.

FIGURA 43 - CLASSIFICAÇÃO DAS ANOMALIAS AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DE K, U E Th

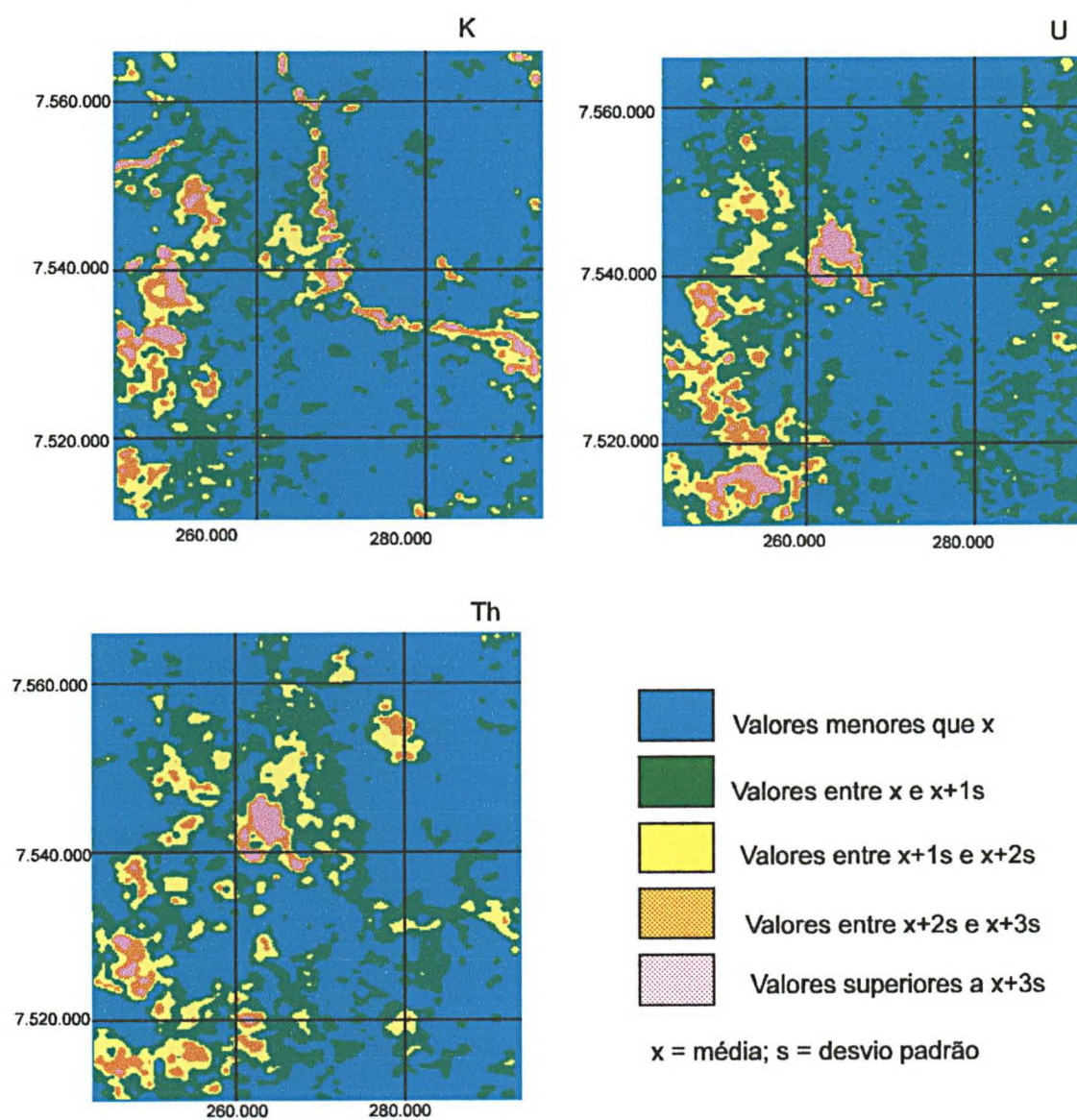


FIGURA 44- CLASSES DE SOLOS COM ANOMALIAS ($>X + 3s$)
DE K (a), U (b) e Th (c)

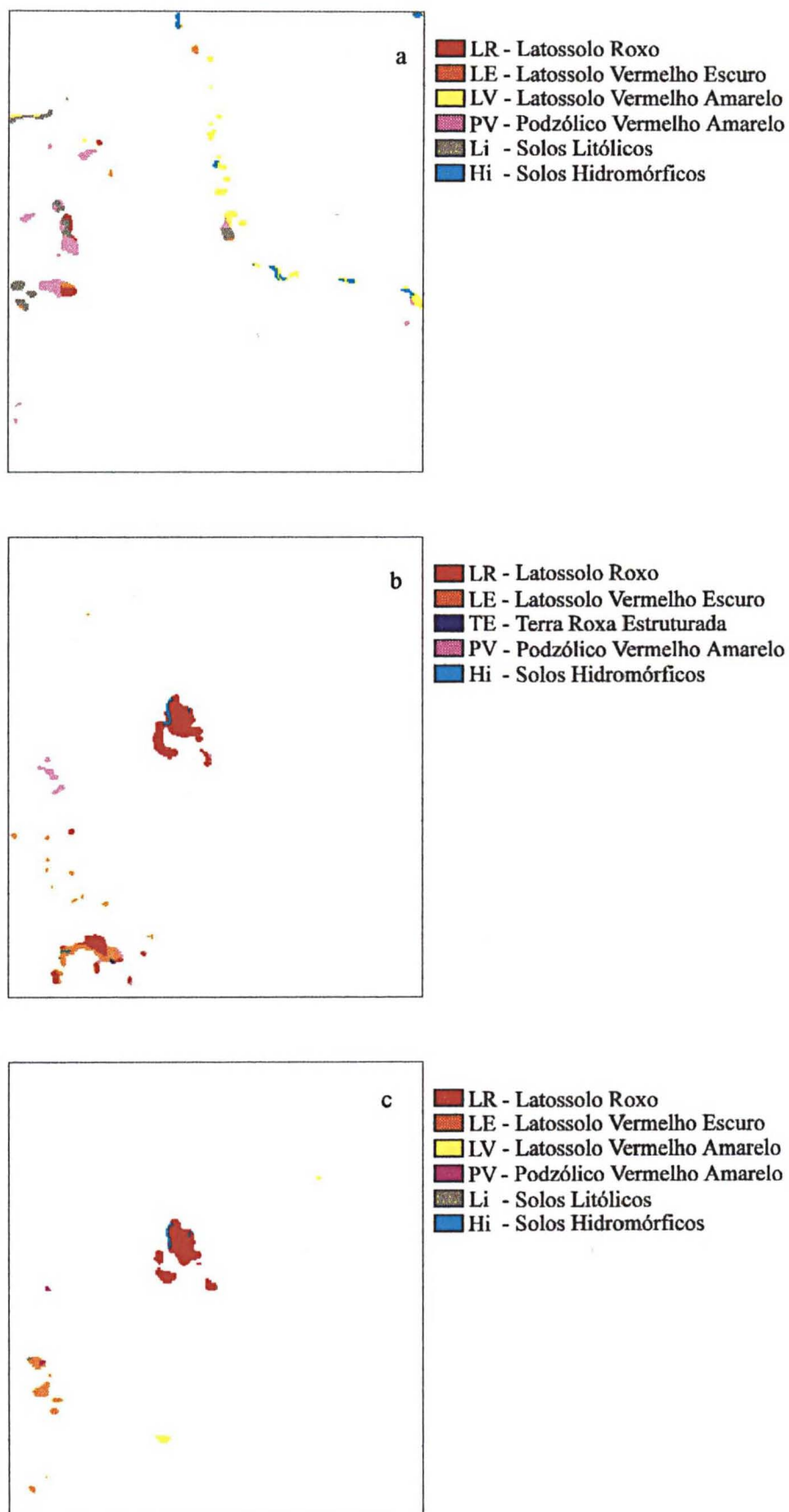


FIGURA 45 - MDT E *LAYERS* ANOMALIAS
($>X + 3s$) DE U E K

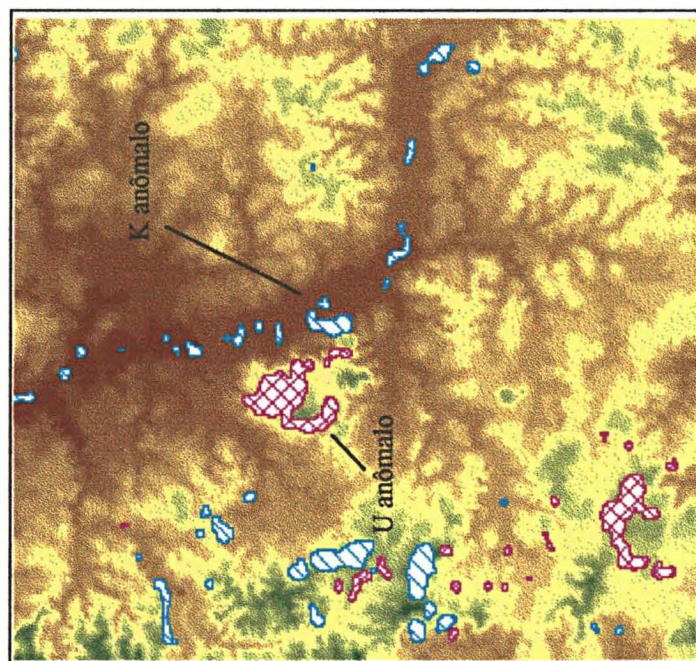
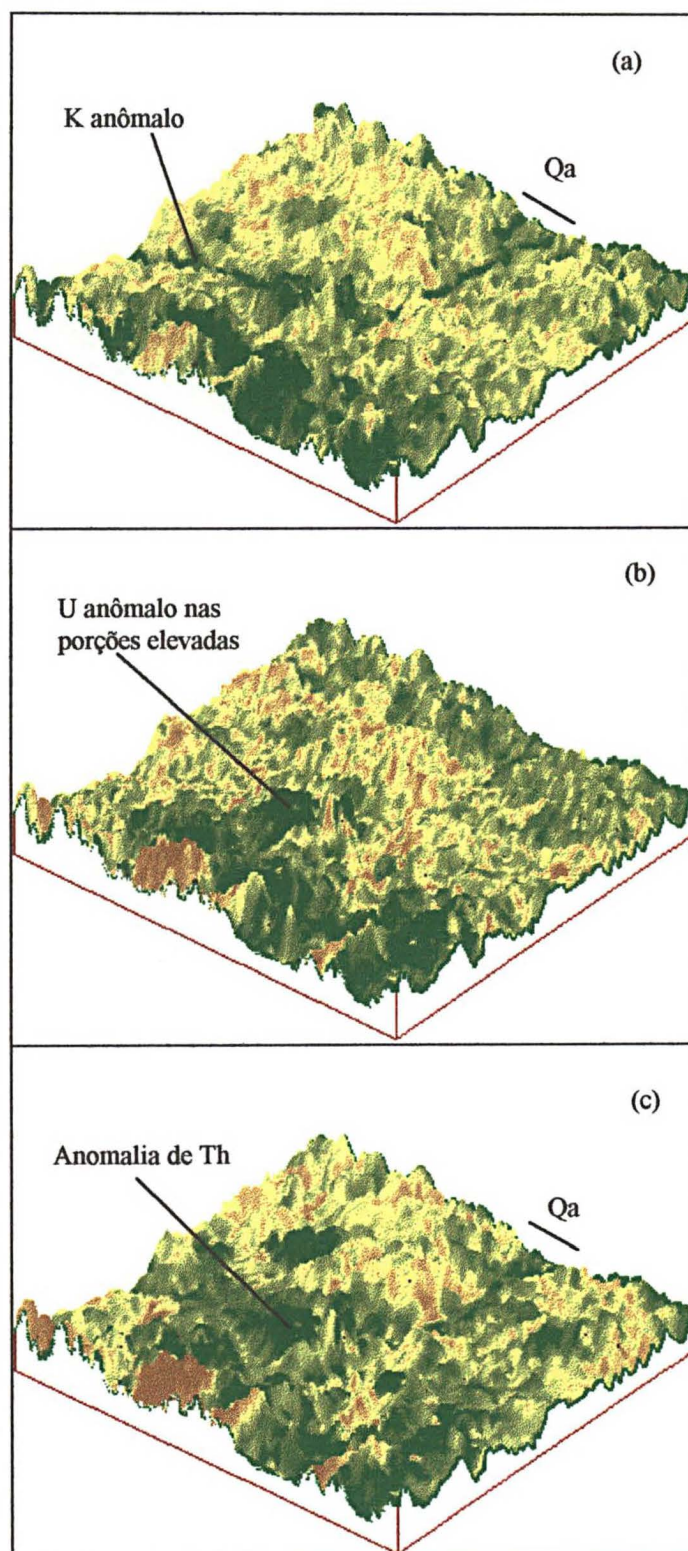


FIGURA 46 - IMAGENS
AEROGAMAESPECTROMÉTRICAS DE K (a), U
(b) E Th (c) INTEGRADAS AO RELEVO



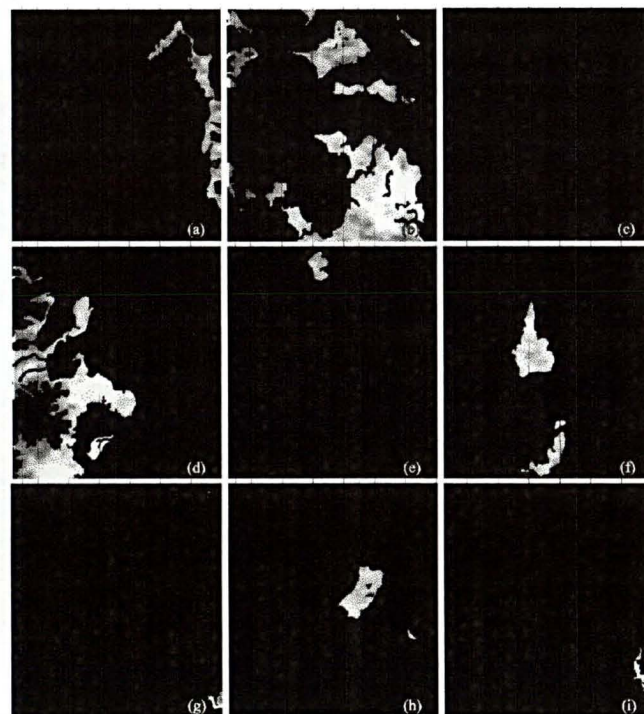
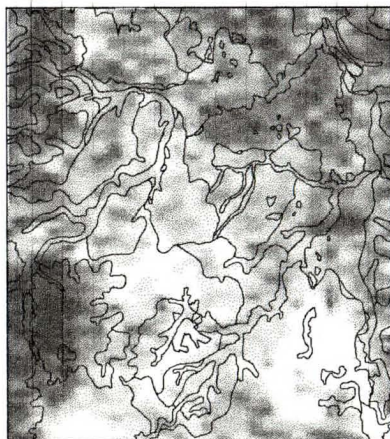
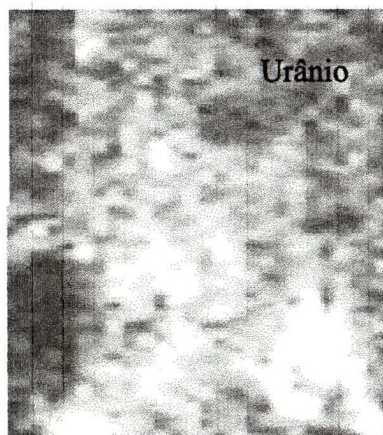
Como os Latossolos Roxos identificados na área da presente pesquisa são derivados de processos maduros de intemperismo de rochas básicas, é provável que as anomalias de U e Th, sejam explicadas pela:

- menor mobilidade de U e Th quando comparados ao K;
- tendência destes radionuclídeos a serem rapidamente adsorvidos em minerais de argila e co-precipitados em óxidos de ferro nos solos, conforme Dickson & Scott (1990 *apud* Wilford *et al.* 1997);
- concentração de U e Th na parte superior do perfil intemperizado devido a presença de argilas e/ou óxidos de ferro, como verificado por Koons (1980 *apud* Wilford *et al.* 1997) e Dickson & Scott (1997).

Entretanto, o urânio e o tório ali presentes também podem ser derivados da adição de fertilizantes fosfatados acrescidos ao comportamento destes elementos frente aos processos intempéricos, os quais culminam com o acúmulo natural de urânio e tório associados aos elevados teores de argilas (Anexo III) e óxidos de ferro.

Assim, uma outra integração que reforça a hipótese de que o urânio ocorre preferencialmente em solos argilosos, é o cruzamento das informações geofísicas de urânio com as classes de formações superficiais tabuladas com a mineralogia e a litologia. Selecionou-se estas classes da folha de Leme e gerou-se uma imagem booleana para cada classe correspondente às granulometrias argila, e argila e silte. Estas imagens foram então multiplicadas com a imagem de 8 bits do urânio. A Figura 47 mostra os resultados obtidos. Observa-se que a classe soleiras de diabásio, regolito, granulometria argila (Figura 47c) e a classe Formação Corumbataí, regolito granulometria argila (Figura 47d), são as que ocorrem nas regiões de elevados valores de urânio, representados por tons claros de cinza.

FIGURA 47 - IMAGEM DE 8 BITS DE U E LITOLOGIAS COM GRANULOMETRIA ARGILA, ARGILA E SILTE DA FOLHA DE LEME



- (a) Aluvião do quaternário, granulometria argila
- (b) Soleiras diabásicas, regolito, granulometria argila;
- (c) Soleiras diabásicas, regolito, granulometria silte e argila;
- (d) Formação Corumbataí, regolito, granulometria argila;
- (e) Formação Irati, regolito, granulometria silte e argila;
- (f) Formação Irati, regolito, granulometria argila;
- (g) Formação Tatuí, aluvião, granulometria silte argila;
- (h) Formação Tatuí, regolito, granulometria argila;
- (i) Formação Tatuí, regolito, granulometria silte e argila.

8.2 Resultados Radioquímicos

Os resultados das análises radioquímicas (Anexo IV) de urânio natural, U^{238} e tório natural, realizadas no Laboratório do Serviço de Proteção Radiológica (SPR) do Instituto de Energia Nuclear (IEN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), são apresentados na Tabela 33.

TABELA 33 - RESULTADOS ANALÍTICOS DE URÂNIO E TÓRIO DE AMOSTRAS DE SOLOS E FERTILIZANTES DA ÁREA DE ESTUDO

Amostra	U_{nat} (ppm)	U_{nat} Bq/kg (seco)	U^{238} Bq/kg (seco)	Th_{nat} Bq/kg (seco)	Th_{nat} (ppm)
800/96	$7,58 \pm 0,23$	$182,60 \pm 5,50$	$94,05 \pm 2,80$	-	-
803/96	$3,87 \pm 0,12$	$93,08 \pm 2,81$	$47,95 \pm 1,48$	-	-
804/96	$11,56 \pm 0,49$	$278,40 \pm 11,73$	$143,40 \pm 6,05$	$14,08 \pm 2,16$	$3,46 \pm 0,53$
808/96	$3,97 \pm 0,15$	$95,70 \pm 0,35$	$49,30 \pm 0,18$	$21,36 \pm 2,12$	$5,25 \pm 0,52$
811/96	$8,0 \pm 0,29$	$192,70 \pm 7,11$	$99,26 \pm 3,66$	-	-
816/96	$6,26 \pm 0,28$	$150,70 \pm 6,83$	$77,64 \pm 3,54$	-	-
FSS	$21,83 \pm 0,58$	$533,92 \pm 14,13$	$270,70 \pm 7,28$	$402,52 \pm 12,70$	$98,9 \pm 3,12$
4-20-20	$18,53 \pm 0,63$	$446,0 \pm 15,17$	$229,80 \pm 7,81$	$191,7 \pm 8,79$	$47,1 \pm 2,16$
4-14-08	$7,93 \pm 0,29$	$190,9 \pm 7,13$	$98,36 \pm 3,67$	$622,71 \pm 49,25$	$153,0 \pm 12,1$

8.2.1 Amostras de Solos

As amostras de números 800/96; 803/96; 804/96; 808/96; 811/96; 816/96; são referentes a amostras de solos coletadas nas seguintes profundidades e localidades:

800/96: 0 - 20 cm; Ponto 4; Usina São João - Araras;

803/96: 0 - 40 cm; Talhão 4004/4; Área de sacrificio da Usina São João;

804/96: 40 - 60 cm; Talhão 4004/4; Área de sacrificio da Usina São João;

808/96: 0 - 40 cm; Talhão 4004/16; Área de sacrificio da Usina São João;

811/96: 0 - 20 cm; ponto 5; Usina Cresciumal - Leme;

816/96: 0 - 20 cm; Floresta, Estação Experimental de Limeira;

O solo amostrado no ponto 4, estava inserido em uma paisagem sobre a qual realizava-se a prática de preparo mecanizado do solo. A paisagem mostrava um Latossolo Roxo (Oliveira *et al.*, 1988), desnudo, sob a ação solar, sem nenhuma cobertura vegetal, bem seco. Foram coletadas a cinco profundidades (de 20 em 20 cm), porém analisadas somente os primeiros 20 cm.

As áreas de sacrifício mencionadas, referem-se a áreas pelas quais as usinas despejam os rejeitos de materiais provenientes do processamento da cana-de-açúcar, como a vinhaça e outros resíduos, oriundos da própria usina, como também de outras indústrias, como cinzas (Agifer). Esta vinhaça, bem como outros rejeitos, eram despejados diretamente sobre as redes de drenagem, em décadas passadas. Hoje é comum se observar nas áreas das usinas sulcos que margeiam as áreas de sacrifício, pelos quais estes resíduos são despejados e utilizados como fertilizantes. Os resultados das análises de vinhaça são mostrados no Anexo V. Cabe ressaltar também que bem próxima a edificação da usina, nota-se uma paisagem desoladora. Composta por solos degradados em função da disposição de diversos materiais, e “inclusões” de lagos de despejo químico, onde circulam máquinas e se constroem imensas compostagens de resíduos de cana-de-açúcar, regados a vinhaça distribuída pelos caminhos.

Os solos dos talhões amostrados são Latossolos Roxos (Oliveira *et al.*, 1988). Na tráfegem, verificou-se forte compactação aos 30 cm de profundidade, confirmando a presença de camada adensada devido ao uso de máquinas agrícolas. Eram solos sem cobertura vegetal alguma, sendo a amostragem do talhão 4004/16 retirada do sulco preparado para o despejo de vinhaça.

O ponto 5, amostrado na Usina de Cresciumal na região de Leme, refere-se também a um Latossolo Roxo. Este solo está incluído na área de maior expressão das anomalias de urânio e tório. O solo também estava sendo preparado, relativamente próximo a instalação da Usina. Esta, entretanto, não utiliza o esquema “área de sacrifício”, porém observou-se grandes tubulações margeando áreas pelas quais possivelmente despejava-se material de vinhaça, bem como a presença de pilhas de compostagem distribuídas ao longo da área.

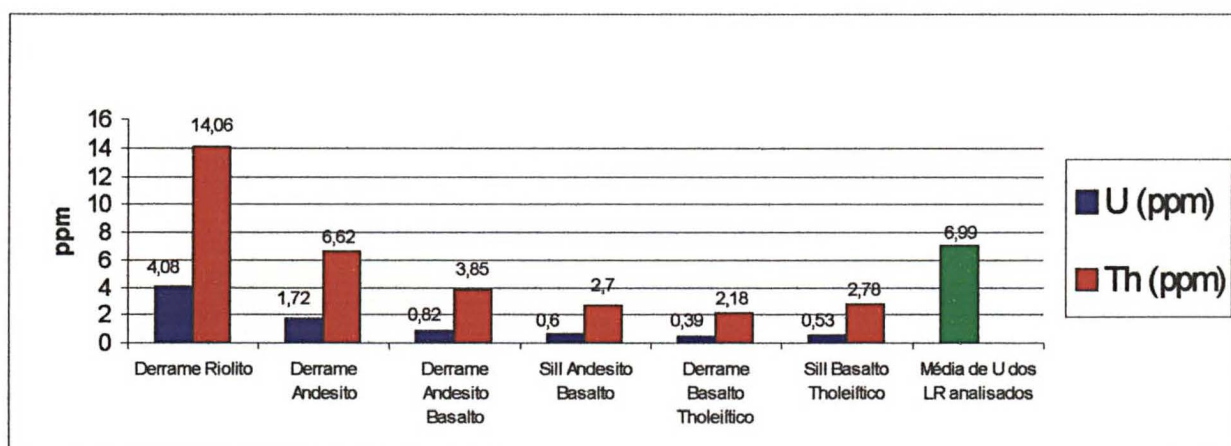
A paisagem deprimente, devido a inexistência de uma área de floresta para se amostrar, fez com que se recorresse a busca de uma região com mínima atividade antrópica. Assim, amostrou-se uma pequena reserva que, segundo informação de técnicos locais, mantinha-se intacta desde 1928, na Estação Experimental de Limeira, situada na região de Araras. Entretanto, cabe ressaltar que nesta área encontram-se Latossolos Vermelhos Escuros, segundo Oliveira *et al.* (1982). Resultados de susceptibilidade magnética, comparativamente

aos outros solos, confirmam esta classe. Tal floresta, é contornada pelo cultivo de *Citrus*, em situação de relevo que leva a refletir sobre a possibilidade de vulnerabilidade de incorporação de produtos químicos oriundos da atividade agrícola local.

Os teores de urânio e tório nos solos é altamente variável. Os teores de urânio em solos normais atingem valores que variam 1 a 8 ppm. Os solos da área da presente pesquisa podem ser considerados normais, ou seja, não são solos de áreas potencialmente uraníferas, os quais podem atingir valores de até 50 ppm. Contudo, Boyle (1982), cita que o teor médio de urânio em solos normais é de 1 ppm. Assim, observa-se pelos resultados das análises radioquímicas, que todos os solos apresentam valores superiores a este valor médio. As menores concentrações encontradas foram nas amostras superficiais das áreas de sacrifício da usina, com teores de $3,87 \pm 0,12$ e $3,97 \pm 0,15$ ppm. O resultado do solo amostrado no ponto 5 (811/96), onde estão inseridas as anomalias geofísicas de maior extensão espacial da presente pesquisa, resultou em $8,00 \pm 0,29$ ppm de U, com valores próximos ao da amostra 800/96 ($7,58 \pm 0,23$) e superiores ao solo da floresta, com $6,26 \pm 0,28$ ppm.

A média de U dos Latossolos Roxos analisados (6,99 ppm) mostraram-se superiores aos valores encontrados por Marques (1988) em rochas ácidas, intermediárias e básicas da Bacia do Paraná onde está situada a Quadricula de Araras. Uma comparação pode ser verificada pela análise do gráfico da Figura 48.

FIGURA 48 - COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA DE U (ppm) DE ROCHAS VULCÂNICAS DA BACIA DO PARANÁ (Marques, 1988) E A MÉDIA DE U (ppm) DOS LATOSSOLOS ROXOS DA PRESENTE PESQUISA



Apesar dos Latossolos Roxos serem solos exclusivamente derivados de rocha básica, verifica-se que os teores encontrados de radioelementos nos solos amostrados foram superiores ao valor médio encontrado por Marques (1988) em derrames de rochas ácidas (derrame de riolito) e intermediárias (derrame de andesito). E, em maior grau ainda, a superioridade de U foi verificada em relação às rochas básicas (derrames e *sills* de andesito basalto e basalto tholeiítico).

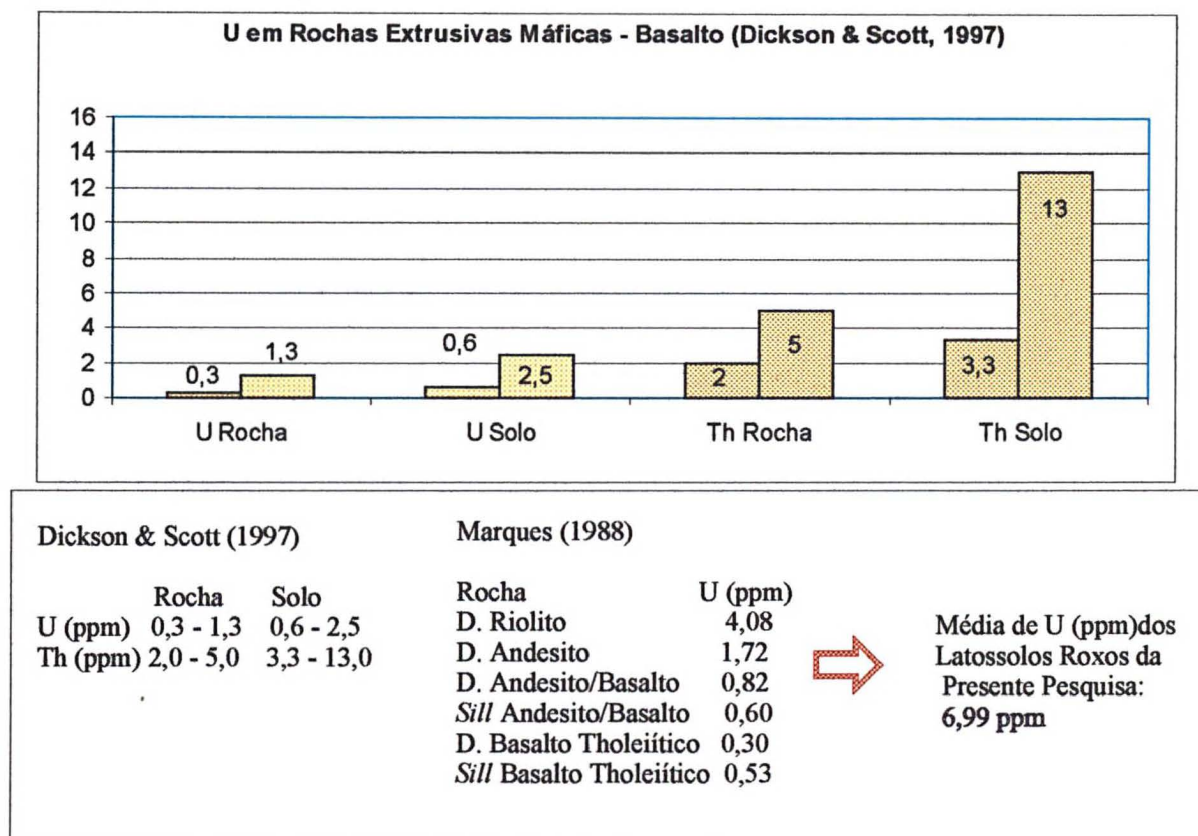
Os teores de tório só foram analisados para algumas amostras da “área de sacrifício”. Os valores mostraram-se bem baixos em relação aos teores indicados pela literatura (Boyle, 1982), de 0,1 a 50 ppm e teores médios de 5 ppm.

Também como pode ser verificado, os teores de Th encontrados para os solos (amostras 804 e 808) mostraram valores superiores em relação às rochas básicas, principalmente em relação aos basaltos tholeiíticos (Figura 48).

Cabe ressaltar que na amostra de solo de maior profundidades (40-60 cm), o teor de urânio mostrou o maior valor ($11,56 \pm 0,49$ ppm). Assim, como verificado por Dickson & Scott (1997), os teores de U são mais elevados nas camadas do solo de maior concentração de argilas e/ou óxidos de ferro.

Assim, quando comparados aos dados dos solos derivados de rochas extrusivas máficas (basalto) estudados por Dickson & Scott (1997), os solos da presente pesquisa mostram um incremento de urânio bem maior em relação ao seu material de origem, refletindo assim a eventual possibilidade do incremento de radionuclídeos (U e Th) provenientes da adição de fertilizantes fosfatados, bem como o acúmulo natural de urânio e tório associados aos elevados teores de argilas e óxidos de ferro. A Figura 49 mostra este comparativo.

FIGURA 49 - COMPARATIVO ENTRE INCREMENTO DE U (ppm) ROCHA-SOLO DA PRESENTE PESQUISA E U (ppm) ROCHA-SOLO ESTUDADOS POR Dickson & Scott (1997)



Apesar da geofísica aérea apontar para valores anômalos de U e Th nas regiões onde estes pontos foram amostrados, as análises radioquímicas mostraram concentrações baixas destes radionuclídeos. Entretanto cabe ressaltar que os resultados radioquímicos, estatisticamente, não são representativos, uma vez que o número de amostras não é condizente com a extensão da área de pesquisa, a qual abrange cerca de 278.865 ha, onde estão inseridas diferentes unidades de solos, em distintas paisagens, as quais requerem uma metodologia de amostragem com maior acurácia para serem comparadas com resultados de um levantamento aerogamaespectrométrico. Esta pode ser uma das limitações dos resultados da presente pesquisa.

Os levantamentos aerogamaespectrométricos, normalmente, têm sido utilizados como uma ferramenta de interesse industrial para a exploração mineral e para a localização de depósitos uraníferos, além de contribuir com mapeamentos geológicos (Wilford *et al.* 1997). Apesar de já terem sido utilizados dados de radiação gama para se mapear tipos de regolitos

(Swawrzer 1972 *apud* Wilford *et al.* 1997), a resposta e a distribuição de radioelementos em materiais intemperizados é muito pouco conhecida (Wilford *et al.*, 1997).

De acordo com Dickson & Scott (1997), embora levantamentos aerogamaespectrométricos envolvam a medida física da radiação gama, este tipo de levantamento é de fato a medida da variação geoquímica de K, U e Th nos primeiros 30 cm da superfície do solo. Entretanto, como visto, algumas mudanças podem ocorrer nas respostas da radiação gama de levantamentos aéreos devido a processos de intemperismo.

Assim, frente a resultados da aerogamaespectrometria, como uma poderosa ferramenta para a detecção da radiação gama emitida pelos solos, seja natural ou introduzida, deve-se levar em consideração os vários fatores atuantes na formação dos solos, bem como uma seleção adequada de horizontes diagnósticos e um número de amostras para análises radioquímicas condizentes com a escala do levantamento. Entretanto, a comparação com os dados da média de U (tabelas 21 e 22), obtidos por Rothbaum *et al.* (1979), em amostras de solos de diferentes áreas, onde P foi aplicado anualmente durante os anos de 1870 - 1880, 1940 - 1950 e 1976, mostra que os resultados radioquímicos do urânio das amostras de solos da presente Dissertação, são superiores aos dados obtidos pelos autores mencionados, nas camadas superficiais e subsuperficiais dos solos.

Situação semelhante foi observada com os resultados do total de urânio das frações leves e pesadas do solo. Rothbaum *et al.* (1979), observaram que nas frações de elevado teor de matéria orgânica, teores de urânio se mostraram bem maiores que os encontrados na fração pesada dos solos onde P foi aplicado. Estes resultados, Tabela 24, referem-se aos primeiros 22,5 cm do solo. Resultados de teores de matéria orgânica dos solos da presente pesquisa, revelaram solos com baixos teores de C (%), como observados nos resultados da análise de solos de rotina (Anexo II). Para as amostras de solos acima investigadas, os teores de C, expressos em % foram: 800/96: 1,51%; 803/96: 1,84%; 804/96: 1,05%; 808/96: 2,23%; 811/96: 2,04%; 816/96: 2,5%.

Assim, se os solos investigados apresentassem teores de matéria orgânica tão elevados quanto os solos investigados por Rothbaum *et al.* (1979), esperava-se que os teores de U fossem também elevados, uma vez que tais solos vem sendo fertilizados ano após ano.

Deve-se levar em consideração, também, as diferenças dos solos investigados pela literatura internacional (como os estudados por Rothbaum *et al.*, 1979), os quais mostram valores superiores de P, quando comparados aos teores encontrados em nossos solos. Rothbaum *et al.* (1979) citam que os solos investigados eram argilosos. Os resultados

granulométricos de solos (Anexo III) da presente pesquisa, revelam que as amostras anteriormente relacionadas apresentam apreciáveis percentagens de argila, citadas a seguir:

800/96: 60%; 803/96: 58%; 804/96: 68%; 808/96: 50%; 811/96: 58%; 816/96: 60%.

8.2.2 Amostras de Fertilizantes

Os resultados analíticos de amostras de fertilizantes fornecidos pelo Laboratório do Serviço de Proteção Radiológica (SPR-IEN-CNEN), apresentados na Tabela 33, referem-se a: FSS - superfosfato simples (ou SSP); 4-20-20 - mistura NPK, com concentrações de 4% de N, 20% de P_2O_5 e 20% de KCl; 4-14-08 - mistura NPK, com concentrações de 4% de N, 14% de P_2O_5 e 8% de KCl.

Tais fertilizantes foram comprados na região, não representando necessariamente a mesma marca comercial utilizada na área de estudo.

O resultado da análise radioquímica do urânio na amostra de superfosfato simples (Tabela 33), revelou valores bem próximos ao encontrado por Pfister *et al.* (1976) também em amostras de SSP, de 21,51 ppm. Entretanto, valores de tório foram bem superiores ao encontrado por estes autores. Esta diferença pode ser atribuída a origem da matéria-prima (rocha) utilizada na fabricação deste fertilizante. Menzel (1968), cita que jazidas de origem ígnea apresentam teores de tório bem superiores ao de urânio. Assim, provavelmente, a rocha usada para a fabricação do fertilizante analisado era de origem ígnea. Paschoa *et al.* (1984), descrevendo resultados analíticos em amostras de SSP oriundas de rochas ígneas, como as de Araxá e Tapira, encontraram concentrações médias de U (Tabela 20) de 94 ± 10 ppm e 24 ± 3 ppm, respectivamente. Portanto, teores de urânio em fertilizantes produzidos a partir de matérias-primas nacionais de mesma origem geológica (ígnea ou sedimentar), podem apresentar variações nos teores de urânio. Contudo, apesar dos dados se assemelharem com os encontrados na literatura internacional, não se pode afirmar que a matéria-prima utilizada era necessariamente de origem nacional, uma vez que as fontes utilizadas na fabricação de fertilizantes nacionais podem ser importadas, apesar dos dados de Puggina (1994) revelarem que da demanda nacional de SSP, 94,6 % são produzidos no Brasil.

A influência da origem geológica da fonte de matéria-prima utilizada nas formulações também foi observada na amostra investigada (4-20-20). Das fórmulas comerciais com concentrações de 20% de P_2O_5 estudadas por Pfister *et al.* (1976), Tabela 13, as que obtiveram valores inferiores a $18,53 \pm 0,63$ ppm, foram apenas os tipo Kampka NP 20-20-0,

com 11,52 ppm e a espécie RUSTICA 20-20-0, com teor $< 1,54$ ppm. Os autores citam que esta última espécie foi formulada com fosfato de Kola (ex-URSS, de origem ígnea). As restantes, também com concentrações de 20% de P_2O_5 , mostraram concentrações de urânio bem mais elevadas, e teores baixos de tório, denotando a origem sedimentar da fonte.

Guzman (1992), obteve valores de urânio de $90,58 \pm 0,83$ ppm e $80,00 \pm 4,3$ ppm em amostras de fertilizantes contendo 20% de P_2O_5 , através de diferentes métodos. A fonte fosfatada utilizada nestes fertilizantes era de origem sedimentar. Estes valores foram bem superiores aos encontrados na fórmula 4-20-20 da amostra analisada pela presente Dissertação.

Devido às elevadas concentrações de P, as fontes de fósforo utilizadas nos fertilizantes formulados, nos quais se analisou o urânio e o tório, podem ser diversas. Assim, para o fechamento da fórmula 4-20-20, usando-se sulfato de amônio como fonte de N e cloreto de potássio como fonte de K_2O , a fonte de P_2O_5 poderá ter sido SSP + STP (super fosfato triplo), ou SSP + MAP (fosfato de amônio), ou ainda somente o STP. Geralmente, como é uma formulação de elevada concentração de P_2O_5 , é muito comum que a fonte de fósforo seja proveniente de SSP + MAP, principalmente devido aos menores custos. Também em algumas combinações NPK, gesso pode ser adicionado para o fechamento adequado da fórmula.

A combinação 4-14-08, apesar de não ser uma fórmula utilizada na cultura da cana-de-açúcar, também foi analisada. As fontes de P_2O_5 desta formulação também podem ser diversas.

Ao analisar os resultados dos teores de radionuclídeos nos fertilizantes pesquisados por Pfister *et al.* (1979), verifica-se que além da influência geológica, como anteriormente mencionado, há um aumento nas concentrações de urânio com o aumento dos teores de P_2O_5 do fertilizante.

Pfister *et al.* (1976), citam que a elevada concentração de urânio em fertilizantes STP, em relação ao SSP, é devido ao próprio processo de fabricação do primeiro, que envolve o ataque da rocha (concentrado fosfático) com ácido fosfórico, o qual retém o urânio sob a forma de um complexo uranil dissolvido. Os fosfatos de amônio (MAP e DAP), são obtidos pela reação entre ácido fosfórico e amônio em proporções adequadas. A obtenção destes fertilizantes é feita pela reação da amônia anidra e ácido fosfórico. Guimond (1978), obteve concentrações superiores de ^{238}U em MAP e DAP em relação ao SSP. Entretanto, o concentrado fosfático a que este autor se refere é um superfosfato triplo, pois o mesmo cita que é um fertilizante obtido pelo ataque da rocha com ácido fosfórico, que por sua vez exibiu valores próximos aos de MAP e DAP e superior ao do SSP.

Pfister *et al.* (1976), obtiveram em amostras de fertilizantes NP, como a marca comercial ENPEKA Ammonphosphat (Tabela 13), concentrações de U_{nat} bem superiores a encontrada na fórmula analisada na presente Dissertação. Entretanto, as concentrações de tório mostraram-se bem mais baixas. A fórmula analisada pelos autores mencionados continha uma concentração de P_2O_5 bem elevada (52%).

Apesar de Guimond (1978) sugerir a importância de se conhecer a origem do fósforo (se é proveniente de um superfosfato triplo, de um superfosfato simples, ou de um MAP), em combinações NPK, as concentrações de radionuclídeos não irão necessariamente responder conforme o tratamento químico ou o processo de produção dos fertilizantes fosfatados a partir das fontes utilizadas no fechamento da fórmula. Uma formulação NPK, pode ser constituída somente de MAP como fonte fornecedora de P_2O_5 e mostrar teores semelhantes ao de uma amostra única de SSP, devido a similaridade da concentração de P_2O_5 .

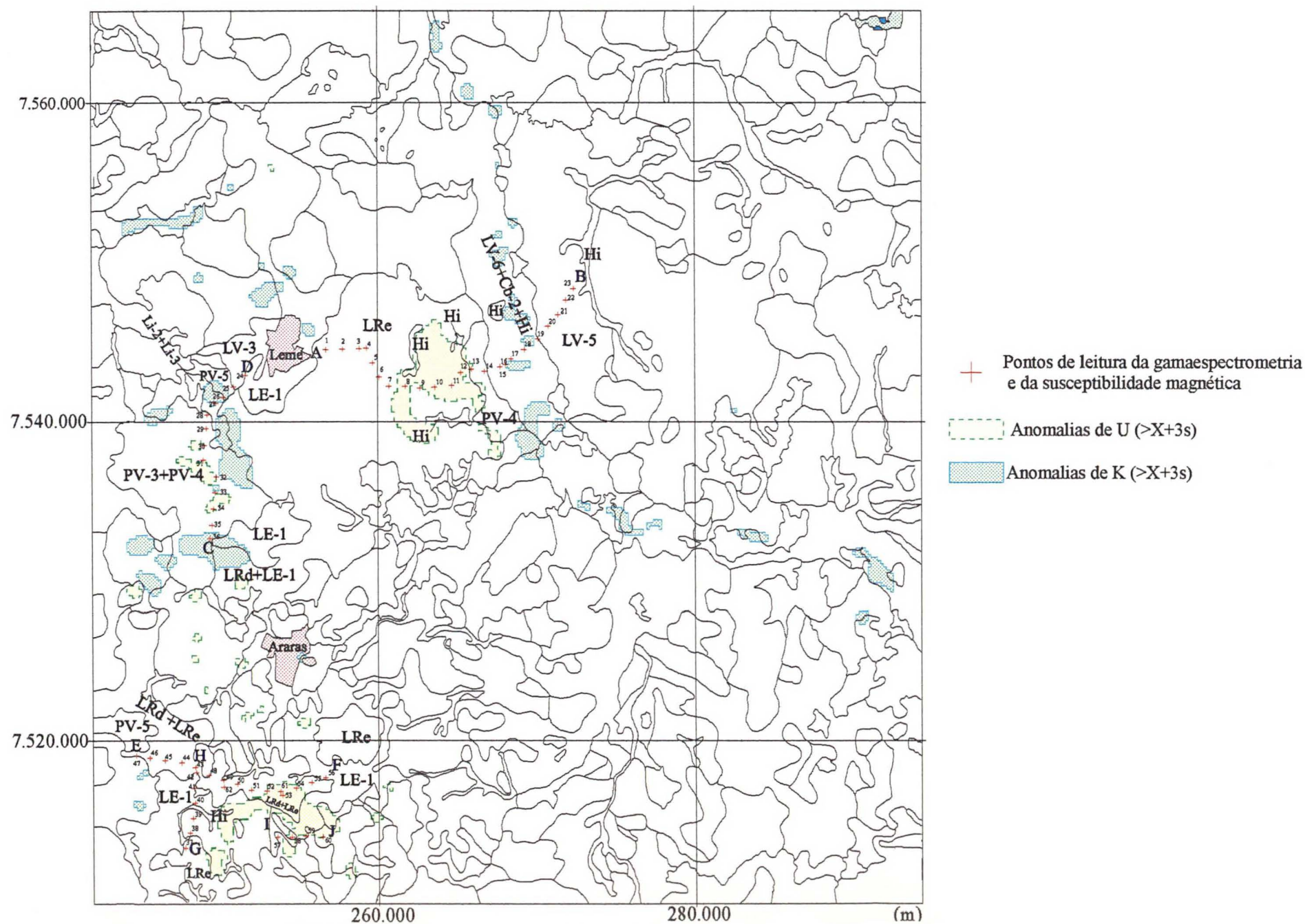
Mesmo considerando que a amostra 4-20-20 seja constituída de SSP + MAP, o que é mais provável e comum nos fertilizantes da região, os teores de urânio deveriam ser próximos ao do SSP analisado, uma vez que a concentração na fórmula de P_2O_5 é de 20% e na amostra de superfosfato varia entre 19 a 21%. De fato, os resultados de U_{nat} nos tipos SSP e NPK foram semelhantes ($21,83 \pm 0,58$ e $18,53 \pm 0,63$, respectivamente).

A fórmula 4-14-08, com teores de P_2O_5 inferiores aos dos outros fertilizantes analisados, mostrou uma concentração menor de urânio, confirmando-se assim que as concentrações de urânio crescem com os teores de P_2O_5 dos fertilizantes, como observado por Guzman (1992) e Guzman *et al.* (1995).

8.3 Gamaespectrometria Terrestre e Susceptibilidade magnética

As medidas gamaespectrométricas terrestres e de susceptibilidade magnética (k), realizadas em pontos espaçados de aproximadamente 1 km, permitiram a montagem de cinco perfis (A-B, C-D, E-F, G-H, I-J), como mostrado na Figura 50. Para cada ponto realizou-se três leituras referentes a TC2 (contagem total), K, U, Th e k . As medidas gamaespectrométricas foram tomadas com tempo de integração de 10 segundos. As médias obtidas pelas leituras das variáveis citadas, o tipo de cultura instalada, a geologia (IPT, 1993), os solos (Oliveira *et al.*, 1982) e a granulometria (IG, 1980, 1981, 1987) dos pontos de cada perfil são mostrados nas tabelas 34, 35, 37, 38 e 39.

FIGURA 50 - MAPA DE SOLOS MOSTRANDO OS PERFIS GAMAESPECTROMÉTRICOS, DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E AS ANOMALIAS DE U e K ($>X+3s$)



A gamaespectrometria terrestre (K, U, Th e TC_2) e as medidas de susceptibilidade magnética realizadas no perfil A-B indicaram três unidades geológicas (Aluviões do Quaternário, Soleiras Diabásicas e Formação Piraçununga), bem como algumas classes de solos, como os Latossolos Roxos, Latossolos Vermelhos-Escuros e Latossolos Vermelhos-Amarelos.

Os dados da Tabela 34, mostram as médias das variáveis geofísicas terrestres, o tipo de cultura instalada, as classes de solos, a geologia e a granulometria conforme a literatura mencionada. A média da susceptibilidade magnética do ponto 1, revelou ser este um solo de origem básica com contribuição de materiais do Quaternário, pois os dados geológicos do IG (1980) mostram que este ponto está inserido nos aluviões que margeiam o Ribeirão do Meio. Ao comparar esta média ($k = 15,8$) com a média ($k = 35,06$) dos solos de origem básica (Latossolos Roxos) referentes aos pontos 2,3,4,5,6,7,8,9, 12 e 13, sugere-se que a classe de solo do ponto 1, é a do Latossolo Vermelho-Escuro (LE). Os pontos 10 e 11 não foram incluídos no cálculo da média de k dos LR, uma vez que apresentaram susceptibilidade baixa. Cabe ressaltar que dados de Oliveira *et al.* (1982), mostram que na unidade de mapeamento LRe podem ocorrer inclusões das unidade Limeira (LE-1). Souza *et al.* (1998), através de análise de agrupamentos, utilizando-se de dados digitais fisiográficos e geofísicos da folha de Leme (SP), identificaram nesta região Latossolos Vermelhos-Escuros uma vez que tais solos encontram-se localizados nas porções mais baixas, associadas a redes de drenagem mais densas, relacionando-se a uma paisagem mais movimentada e dissecada, quando comparada àquela dos Latossolos Roxos. A Tabela 34 também revela certa diferença entre os dados gamaespectrométricos terrestres (K, U, Th e TC_2) do ponto 1 e aqueles encontrados nos Latossolos Roxos (LR) anteriormente mencionados. O U mostrou-se menor para o ponto 1 (1,0 cps), enquanto a média para os LR foi de 1,62 cps. A principal cultura realizada sobre os LR deste perfil é a cana-de-açúcar, perfazendo cerca de 70% dos LR considerados. Ao comparar-se os dados gamaespectrométricos de um LR associado com cultura de algodão (ponto 6) com os dados do ponto 1 (também sob o mesmo cultivo), observa-se ainda que os dados médios de U e Th ($U = 1,6$ cps; $Th = 0,9$ cps) são superiores em relação ao LE do ponto 1. Os dados médios de K são maiores que o LR do ponto 6, entretanto próximos aos dos LR acima considerados ($K = 1,95$), com exceção do ponto 8 ($K = 3,9$).

Os solos inseridos nos aluviões do Quaternário (pontos 15, 16, 17, 18 e 19) apresentaram média de k (0,68) bem inferior aos solos de origem ou com contribuição básica. Estes solos, considerados por Oliveira *et al.* (1982) como uma associação de solos (LV-6+Cb-

2+Hi), estão sob o cultivo de cana-de-açúcar. Ao comparar-se a média dos radioelementos com as correspondentes dos Latossolos Roxos, verifica-se que estes solos aluviais apresentam média de U e Th (1,55 e 0,95 cps, respectivamente) próximas às encontradas nos solos das soleiras (1,62 e 0,90 cps). Entretanto, a média de K mostrou-se superior (2,34 cps) nos solos aluviais, em função da presença de feldspatos potássicos e micas nos minerais formadores destes solos, bem como pelo potássio lixiviado das porções mais elevadas do terreno, ou ainda o possível despejo de vinhaça sobre as margens do rio Moji-Guaçu.

Com base na integração das informações de gamaespectrometria terrestre, de susceptibilidade magnética, de geologia, de solos e de granulometria, pode-se propor para o perfil A-B que o ponto 1 e 3 referem-se a Latossolos Vermelhos-Escuros. Este último ponto citado, apesar de ter sido considerado um Latossolo Roxo no cálculo da média, é provável que seja um Latossolo Vermelho-Escuro, uma vez que apresenta susceptibilidade magnética média ($k = 20,6$) inferior aos solos de origem básica e se encontram geologicamente em posição de transição entre soleiras de diabásio e aluviões. Situa-se em paisagem semelhante à verificada no ponto 1, sendo possivelmente incluído no *cluster* Latossolo Vermelho-Escuro identificado por Souza *et al.* (1998).

Observa-se também na Tabela 34, que no compartimento referente aos pontos 8, 9, 10, 11, 12 e 13, existe uma tendência aos maiores valores dos dados gamaespectrométricos. A Figura 52, mostra que estes pontos estão inseridos nas anomalias de U ($>X + 3s$) da Tabela 32. Uma das hipóteses seria o uso de fertilizantes fosfatados.

A consistência dos dados gamaespectrométricos terrestres de Ct, K, U e Th pôde ser verificada quando comparou-se o perfil A-B terrestre com os dados digitais aerogamaespectrométricos correspondentes. A partir do perfil terrestre, extraiu-se do arquivo digital aéreo um perfil passando pelos mesmos pontos. Obteve-se assim um arquivo XYZ para cada variável geofísica aérea, o qual foi integrado aos dados de superfície, como pode se observar nas figuras 53, 54, 55 e 56. O mesmo procedimento foi aplicado aos outros perfis. No eixo x do gráfico encontra-se a coordenada UTM dos pontos investigados. Assim, para transcepos horizontais, o eixo das abcissas refere-se ao X (em UTM dos pontos), para os transcepos verticais, refere-se a coordenada Y (UTM). Observa-se nas referidas figuras uma boa correlação entre os dados terrestres e aéreos. Entretanto, quantitativamente, para todas as variáveis, existe uma grande diferença. Além do volume maior do detector aéreo do sistema eletrônico de amplificação, o campo de visão (detecção) de um sensor aerogamaespectrométrico exerce grande influência na captação das radiações gama. Segundo

Grasty *et al.* (1979), diferentemente de uma câmera, um detector aerogamaespectrométrico não tem um campo de visão fixo e pode receber radiação de qualquer ângulo. O campo de visão de um sensor é geralmente considerado como uma área circular abaixo da aeronave. A contribuição relativa de diferentes áreas no terreno, depende da distribuição da fonte de radiação e da topografia. Uma fonte de elevada radioatividade pode ser detectada, mesmo se ela estiver fora do campo de visão nominal. Conseqüentemente, apenas em casos muito especiais de superfícies planas e de fontes homogêneas infinitas, o conceito de campo de visão possibilita uma detecção precisa. Os primeiros cálculos do campo de visão de um detector estacionário de raios gama foi realizado por King (1971 *apud* Grasty *et al.* 1979). Tais cálculos foram repetidos por Godby *et al.* (1972 *apud* Grasty *et al.* 1979) e Duval (1971 *apud* Grasty *et al.* 1979). Todas estas operações citadas pelos autores assumem que um detector tem a mesma sensibilidade, independente do ângulo pelo qual os fótons de raios gama o atingem. Contudo, de acordo com Grasty *et al.* (1979), muitos sensores usados em levantamentos aéreos exibem variações consideráveis de sensibilidade em função do ângulo entre o sensor e a fonte. Para uma mesma camada, um cristal com um diâmetro maior é mais eficiente na detecção das radiações numa direção axial (diretamente abaixo da aeronave) do que nas radiais. Para um mesmo tipo de sensor, terreno e altura de vôo, faixas de amostragens em levantamentos aéreos mostram respostas de raios gama similares aos gamaespectrômetros estacionários, porém estes com círculos de captação bem maiores. Segundo Grasty *et al.* (1979), isto se deve ao fato de que os pontos amostrados pelas linhas de vôo são registrados mais de uma vez, e aqueles próximos à linha de vôo contribuem mais para a taxa de contagem do que os mais distantes. Desta forma, não é fácil comparar dados gamaespectrométricos terrestres pontuais com aéreos, a não ser, por exemplo, pelos procedimentos adotados por Darnley e Fleet (1968).

A Figura 53 mostra que no compartimento pertinente à classe dos Latossolos Roxos, a contagem total mostrou-se bem elevada em relação aos Latossolos Vermelhos-Escuros e Latossolos Vermelhos-Amarelos. Os pontos incluídos na associação de solos LV-6+Cb-2+Hi, referem-se a Latossolos Vermelhos-Amarelos (LV6) sob o cultivo de cana-de-açúcar. Seus dados aéreos mostraram-se bem elevados quando comparados aos Latossolos Vermelhos-Escuros e Latossolos Vermelhos Amarelos (LV-5). Como a contagem total (CT₂) envolve as janelas dos três radionuclídeos, procurou-se averiguar qual deles contribuiria mais para a contagem total. Assim, a Figura 54 (perfil A-B do potássio) mostra que o K é o radionuclídeo que mais exerceu influência na resposta da TC₂ para estes Latossolos Vermelhos-Amarelos

inseridos nos aluviões. Além das características destes solos, com presença de feldspatos potássicos e micas, a condição de relevo favorece uma maior concentração de K nos aluviões do rio Moji-Guaçu, em função da mobilidade deste elemento. Outro aspecto interessante é o comportamento do tório (Figura 56), o qual mostrou, tanto nas medidas aéreas quanto nas terrestres, uma tendência elevada nestes solos quando comparado com os Latossolos Vermelhos-Escuros, por exemplo. Nitidamente, verifica-se que para os Latossolos Roxos, as contagens terrestres e aéreas de U e Th foram maiores do que aquelas dos outros solos. Assim, devido aos processos de evolução pedogenética, os solos mais desenvolvidos, mais argilosos e com maior concentração de óxidos de ferro tendem a reter urânio e tório (Wilford *et al.*, 1997), o que torna estes ambientes originários de material básico, vulneráveis à contaminação radioativa pelos fertilizantes fosfatados.

A Tabela 35 mostra as médias gamaespectrométricas terrestres e de susceptibilidade magnética, bem como os dados geológicos, de solos e granulométricos do perfil C-D. Este perfil foi selecionado com base na imagem aerogamaespectrométrica do urânio (8 bits) (Figura 45b), a qual indicava tons de cinza claros nesta região. Os *layers* do mapa geológico e o de formações superficiais mostravam a predominância de regolitos de granulometria argila, provenientes da Formação Corumbataí. Os pontos 24 e 25, em confronto aos dados digitais do levantamento semi-detalhado realizado por Oliveira *et al.* (1982), são Latossolos Vermelhos-Amarelos da unidade Laranja Azeda (LV-3). Segundo estes autores esta unidade apresenta, dentre outras, propriedades de solos ferralíticos, com material de origem relacionado aos depósitos detríticos arenosos do neo-Cenozóico. IG (1980), indica que nesta região prevalece aluviões de granulometria arenosa. Os pontos citados estavam sob o cultivo de cana-de-açúcar e apresentaram *k* médio de 4,15. É interessante observar que a medida que se aproxima de siltitos da Formação Corumbataí, existe a tendência da diminuição da susceptibilidade magnética média. Este fato pôde ser observado no ponto 26 (*k* = 0,2), representando uma exposição de siltito sem cobertura de solo. Como o ponto 27, segundo Oliveira *et al.* (1982) faz parte da associação de Litólicos (Li-2+Li-3), propõe-se que este ponto investigado seja da unidade Li-2, uma vez que a unidade Li-3 refere-se aos solos derivados de rochas básicas, os quais deveriam apresentar *k* elevados.

Em confronto aos dados de solos, observa-se na Tabela 35 que os pontos 28 a 36 estão inseridos na região dos Podzólicos Vermelhos-Amarelos, pertencentes às unidades Olaria (PV-3) e Santa Cruz (PV-4). A primeira unidade refere-se a um solo ferralítico forte, e ocorre estreitamente relacionada a áreas com substrato pertencente aos sedimentos finos da Formação

Corumbataí. O relevo é suave ondulado, sendo comuns atividades agrícolas como algodão, cana-de-açúcar e *Citrus*. Diferencia-se da Unidade Santa Cruz por apresentar menor relação textural, ausência de mudança textural abrupta e maior espessura. A unidade PV-4, um solo ferruginoso tropical, ocorre em relevo suave ondulado a ondulado dissecado, com substrato de sedimentos argilosos do Permo-Carbonífero. A maior parte desta unidade foi mapeada em associação com a unidade Olaria ou com solos litólicos de substratos finos do Permiano. O principal uso destes solos é com algodão, cana-de-açúcar e *Citrus*. A Tabela 36 mostra dados provenientes de um perfil de solo da Unidade Olaria (PV-3) de acordo com Oliveira *et al.* (1982). Para uma profundidade de 0 - 26 cm, foram identificados teores de Fe_2O_3 iguais a 9,7% e a média para as camadas inseridas entre 26 e 250 cm foi de 11,8%. Num perfil da Unidade Santa Cruz (PV-4), o horizonte A (0 - 20 cm) apresentou valores de 2,3% de Fe_2O_3 e entre 20 e 118 cm uma média de 4,9% de Fe_2O_3 . Aliada a estas características diferenciais de teores de óxidos de ferro, as informações de susceptibilidade magnética e de campo, permitiram separar estas unidades. Assim, propõe-se que os pontos 28, 29, 35, 36 pertencem a unidade PV-4, uma vez que suas susceptibilidades magnéticas médias foram menores ($k = 1,4$), os solos eram mais claros, mais arenosos e em situação de relevo mais movimentado do que os outros podzólicos dos pontos 30, 31, 32, 33 e 34, os quais apresentaram susceptibilidade magnética média de 3,5 e eram mais avermelhados e argilosos, podendo desta forma serem classificados como pertencentes a unidade PV-3.

As correlações entre os dados gamaespectrométricos aéreos e terrestres do perfil C-D são boas, como podem ser observadas nas figuras 58, 59, 60 e 61. A resposta do urânio (U médio = 1,82) relacionada aos podzólicos é maior na faixa Unidade Olaria (PV-3). Como citado anteriormente, a ausência de caracter abrupto da unidade Olaria, somada a sua textura argilosa ou média argilosa, leva a concluir que quando comparada a unidade PV-4, a qual possui horizonte A mais arenoso, a unidade PV-3 tende a adsorver o urânio nos horizontes. O mesmo pode ser verificado com o tório. A Figura 59 mostra incrementos de K na faixa dos litólicos. Como citado por Wilford *et al.* (1997), existe uma tendência de depleção de K durante o intemperismo e adsorção de U e Th nos solos. Comparando-se então as médias de K, U e Th do ponto 26 (siltito aflorante) e do Litólico (ponto 27), com os dados médios de K, U e Th dos solos provenientes deste mesmo material, como os podzólicos, na Tabela 35, verifica-se uma depleção de K. Assim, o pico observado nas linhas aéreas e terrestres é proveniente do siltito exposto e do Litólico. Entretanto, as contagens de urânio no siltito mostraram-se bem mais elevadas do que nos solos, apontando para a necessidade de um

número maior de medidas em siltitos para que se possa realizar uma comparação mais adequada entre os valores de U e Th em solos e rochas.

A Figura 67 mostra a curva referente a média da susceptibilidade magnética do perfil E-F. Em confronto aos dados de solos e geológicos, como mostrado na Tabela 37, observa-se que os solos deste perfil correspondem aos Latossolos Roxos (LR). Entretanto, os dados geológicos do mapa de formações superficiais de Araras, indicam a presença da Formação Irati (Pi) com regolitos de granulometria argila, entre os pontos 52, 53, 54, 55 e 56. Assim, como pode ser verificado na Figura 63, a susceptibilidade magnética é menor naquelas litologias (pontos 53, 54, 55 e 56). Tais Latossolos estão inseridos na “transição” entre a Formação Irati e soleiras de diabásio, com contribuição de siltitos e argilitos da citada Formação (foto da Figura 51a e Figura 68). A Formação Irati, segundo Brollo (1991), aflora próxima a zona de falhamentos e intrusões de grandes *sills* de diabásio. Portanto, uma média de $k = 10,5$ destes pontos é menor do que os valores médios dos solos (pontos 46, 45, 44, 43, 48, 49, 50, 51 e 52) derivados de soleiras diabásicas (JK β) de granulometria argila ($k = 30,2$), demonstrando que a susceptibilidade magnética pode indicar a fonte de Latossolos. O ponto 62 do perfil E-F, refere-se a uma estação situada em uma frente de lavra de diabásio (foto da Figura 51b), a qual apresentou média de $k = 29,4$. Uma estreita camada de solo (ponto 63) desenvolvida sobre a pedreira, representando um Litólico (Li-3) sem nenhuma atividade agrícola, apresentou uma média de k de 20,3.

Ao comparar-se os dados gamaespectrométricos de U (Tabela 37) dos solos cultivados, observa-se que independentemente do material de origem, todos aqueles com atividade agrícola e bem desenvolvidos apresentam em sua maioria altos índices deste radionuclídeo. Entretanto, a média de U (0,95) dos solos cultivados considerados como Latossolos Roxos (pontos 46, 45, 44, 43, 48, 49, 50, 51 e 52) é menor do que a média ($U = 1,7$ cps) dos Latossolos Vermelhos-Escuros (pontos 53, 54, 55 e 56). Estes últimos solos mostraram um valor médio de Th de 0,8 cps semelhante ao encontrado nos Latossolos Roxos do perfil A-B ($U = 1,6$; $Th = 0,9$), enquanto que os LR dos pontos referidos apresentaram valores médios de U e Th menores (0,9 e 0,5 cps, respectivamente). A Figura 52 mostra o modelo de elevação digital do terreno com os pontos de campo, onde nota-se que estes LE estão em condições de relevo mais baixo do que os Latossolos Roxos. Os LE situam-se em altitudes entre 660 a 700 m, enquanto os LR dispõem-se entre 700 e 780 m (IBGE, 1969). Um aspecto interessante é que os pontos de LE amostrados estão próximos a uma usina de cana-

de-açúcar, a qual tem a prática de despejar vinhaça, durante muitos anos, em áreas ao seu redor, chamadas de “áreas de sacrifício”.

FIGURA 51 - CONTATO *SILL* x SILTITO (a) E PEDREIRA DE DIABÁSIO (b)

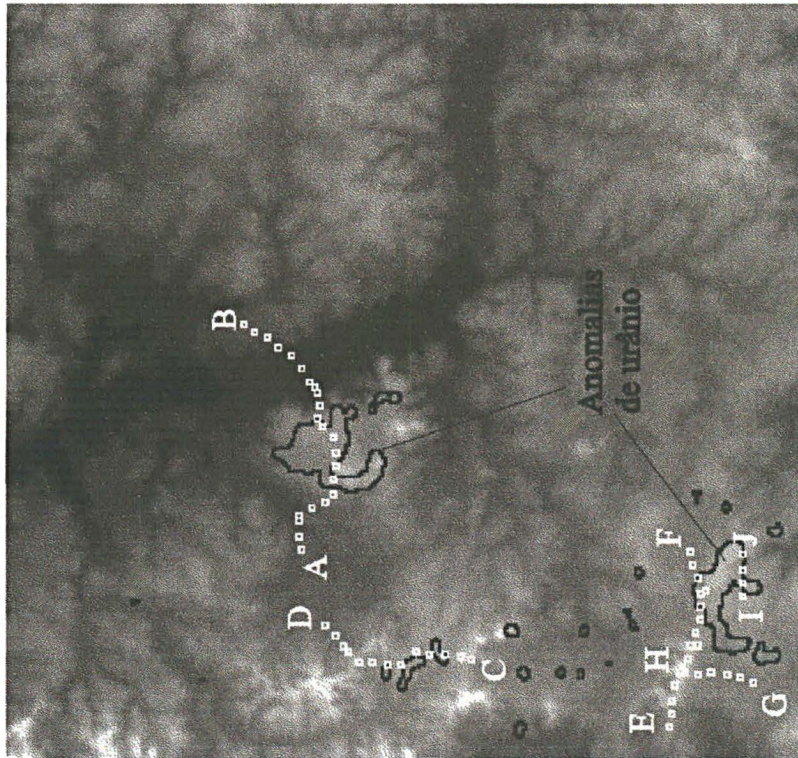


(a)



(b)

FIGURA 52 - MDT INDICANDO OS PERFIS E AS ANOMALIAS DE URÂNIO ($>X + 3s$)



Dados da Tabela 37 também revelam que o K da frente de lavra ($K = 2,37$) foi bem elevado quando comparado com a média verificada nos Latossolos Roxos ($K = 1,33$) e menor do que nos Latossolos Vermelhos-Escuros ($K = 2,7$). Provavelmente, em função do intemperismo, como citado por Wilford *et al.* (1997), nota-se uma depleção do K nos solos mais desenvolvidos. Assim a lixiviação deste radionuclídeo, para as porções mais baixas do terreno pode explicar o incremento do potássio nos Latossolos Vermelhos-Escuros. O urânio e o tório dos Latossolos Roxos do Perfil A-B (Tabela 34) mostraram médias maiores do que o ponto inserido na pedreira do perfil E-F, denotando a retenção do urânio e do tório em solos mais desenvolvidos e com predominância de argilas e óxidos de ferro, como já referido. Entretanto, a maioria dos Latossolos Roxos do perfil E-F mostraram média de U e Th menores e próximas a da pedreira, com exceção dos pontos 50, 51 e 52 onde verifica-se uma tendência a uma diminuição das cotas do terreno. Esta situação denota o desequilíbrio radioativo, uma vez que o sistema deve ser considerado aberto.

As figuras 63 a 66 mostram a correlação existente entre as curvas gamaespectrométricas aéreas e terrestres da contagem total, do potássio, do urânio e do tório no perfil E-F e confirmam as discussões acima realizadas.

Dados gamaespectrométricos e de susceptibilidade magnética (figuras 69, 70, 71, 72 e 73), geológicos, de solos e de formações superficiais do perfil G-H são mostrados na Tabela 38. Observa-se que o k dos pontos 41 e 42 é superior aos demais pontos estudados. Entretanto a sua média ($k = 13,8$) é inferior a média de k até então encontrada para os Latossolos Roxos. Assim, os pontos 41 e 42 podem ser Latossolos Vermelhos-Escuros como os demais pontos do perfil G-H, diferenciando-se pela contribuição da unidade geológica envolvida. Oliveira *et al.* (1982), classificaram estes solos como pertencentes a unidade Limeira (LE-1). Eles são ferralíticos fortemente dessaturados, representados por sedimentos argilosos retrabalhados oriundos de argilitos das Formações Irati e Corumbataí, com contribuição de rochas básicas. Comparativamente aos solos de outros perfis inseridos na Formação Corumbataí (Pc), como os podzólicos do perfil C-D, observa-se que a contribuição de material básico para os solos deste (pontos 41 e 42) é maior, conferindo-lhe uma susceptibilidade magnética mais acentuada (Figura 73). Entretanto, apesar dos solos considerados apresentarem textura argilosa e possivelmente maior concentração de óxidos de ferro, os valores de urânio e tório são menores que os LE da Formação Irati (40, 39, 38, 37), os quais apresentaram médias de $U = 0,6$ e $Th = 0,4$, portanto próximas às encontradas na faixa de LR das porções mais elevadas do terreno do perfil E-F (pontos 46, 45, 44, 43, 48, 49),

como indicado na Tabela 37 e figuras 65 e 66. Os pontos inseridos na Formação Irati do perfil G-H apresentam valores de K, U e Th médios de 2,4; 1,8 e 1,3 , respectivamente. Tais valores elevados mostram, da mesma maneira que no perfil E-F, a medida que as cotas do terreno diminuem, que existe uma tendência na concentração dos radionuclídeos quando o material é proveniente da mencionada Formação, juntamente com material de origem básica (JK β).

As boas relações existentes entre a gamaespectrometria aérea e a terrestre do perfil GH pode ser verificada nas figuras 69 a 72 e confirmam as discussões anteriores. A contagem total (Figura 69) mostra uma resposta maior para os LE inseridos na Formação Irati. O mesmo pode ser observado para o K (Figura 70), o U (Figura 71) e o Th (Figura 72).

O perfil IJ com apenas quatro pontos, mostra que os três primeiros (57, 58 e 59) estavam sob o cultivo de cana-de-açúcar (Tabela 39). O primeiro deles mostrou susceptibilidade magnética média ($k = 9,94$) inferior a média encontrada nas demais estações (Figura 78). A Figura 74 mostra os perfis gamaespectrométricos aéreos e terrestres da contagem total. Com exceção do último ponto, nota-se que para esta janela, as respostas aéreas e terrestres apresentam comportamento semelhante para o Latossolo Vermelho-Escuro da Formação Irati (ponto 57 da Tabela 39). O mesmo pode ser observado na janela do U (Figura 76). Entretanto, não foi observada uma boa correlação para o K e o Th, talvez em função da escassa amostragem (figuras 75 e 77).

TABELA 34 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES (Ct₂, K, U e Th), SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (k), GEOLÓGICOS, GRANULOMÉTRICOS, DE SOLOS E DE USO DO SOLO DO PERFIL A-B

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Ct ₂ (cps)	27,8	29,8	24,1	24,9	30,7	29,9	36,9	69,4	39,4	39,3	83,3	62,4	42,2	25,8	41,2	52,3	36,9	36,3	32,8	22,9	29,7	30,2	31,7
K (cps)	1,8	1,5	1,3	1,3	1,6	1,4	1,8	3,9	2,2	2,1	3,9	2,5	2,1	1,4	1,9	3,5	2,4	1,7	2,1	1,2	1,9	1,6	2,1
U (cps)	1,0	0,8	0,9	0,7	0,9	1,4	2,0	2,7	2,5	2,1	3,2	2,3	1,8	1,1	1,6	1,7	1,4	1,5	1,4	0,8	1,1	1,2	1,3
Th (cps)	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,9	1,2	1,3	1,0	1,0	1,9	1,4	0,8	0,5	0,9	1,3	0,8	0,9	0,8	0,6	0,6	0,5	1,0
k (x 10 ⁻³ SI)	15,8	45,9	20,6	29,2	29,3	47,0	28,5	65,7	27,5	0,9	8,6	23,4	33,4	3,4	1,6	0,4	0,6	0,6	0,2	0,8	0,8	2,0	2,3
Geologia IG (1980)	JK _β (Qa)	JK _β	JK _β (Qa)	JK _β	JK _β	JK _β	JK _β	JK _β	JK _β	Qa	JK _β (Qa)	JK _β	JK _β	Qa	Qa	Qa	Qa	Qa	Qa	Tp (Qa)	Tp (Qa)	Tp	Tp
Form. Sup. (IG, 1980)	Ar (I)	Ar	Ar (I)	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	I	Ar (I)	Ar	Ar	Ar	Ar	I	I	a	A	A	A	AAr	A
Solo (Oliveira <i>et al.</i> , 1982)	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	PV4	LV6+ Cb2+ Hi	LV6+ Cb2+ Hi	LV6+ Cb2+ Hi	LV6+ Cb2+ Hi	LV6+ Cb2+ Hi	LV5	LV5	LV5	LV5
Cultura	Algo- dão	Sorgo	Cana	Cana	Cana	Algo- dão	Cana	Cana	Cana	Euca- lípto	Algo- dão	Citrus	Cana	Milho	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana	Citrus	Citrus	Citrus	Sem cultura

TABELA 35 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES (Ct₂, K, U e Th), SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (k), GEOLÓGICOS, GRANULOMÉTRICOS, DE SOLOS E DE USO DO SOLO DO PERFIL C-D

Ponto	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Ct ₂ (cps)	27.9	43.47	57.23	42.57	27.3	40.9	48.9	50.7	55.6	44.3	48.5	28.9	47.3
K (cps)	1,5	2,1	4,6	4,4	2,1	2,1	2,9	2,7	2,9	2,5	2,2	1,5	2,9
U (cps)	1,0	1,4	3,0	1,3	1,3	1,2	1,8	1,7	2,0	1,6	2,0	1,0	1,5
Th (cps)	0,9	0,9	1,2	0,7	0,7	1,3	1,2	1,1	1,5	0,8	1,3	0,6	1,4
k (x 10 ⁻³ SI)	6,3	2,0	0,2	0,7	0,8	1,0	4,3	2,8	3,7	2,6	3,9	2,5	1,4
Geologia (IG ,1980)	Tp	Tp	Pc	Pc	Pc	Pc	Pc	Pc	Pc	Pc	Pc		
Form. Superf. (IG, 1980)	A	A	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr		
Solo (Oliveira <i>et al.</i> , 1982)	LV3	LV3	Li2+Li3	Li2+Li3	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4	Pv3+PV4
Cultura	Cana	Cana	Rocha	Sem cultura	Citrus	Algodão	Pastagem	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana

TABELA 36 - Fe₂O₃ (%) PELO MÉTODO DE DIGESTÃO TOTAL COM H₂SO₄ 1:1 DAS UNIDADES OLARIA (PV-3) E SANTA CRUZ (PV-4)

PV-3			PV-4		
A1	0 - 26 cm	9,7 % Fe ₂ O ₃	A1	0 - 20 cm	2,3 % Fe ₂ O ₃
B1	26 - 52 cm	11,2 % Fe ₂ O ₃	B1	20 - 31 cm	3,1 % Fe ₂ O ₃
B21	52 - 130 cm	11,9 % Fe ₂ O ₃	B21t	31 - 50 cm	5,5 % Fe ₂ O ₃
B22	130 - 180 cm	11,9 % Fe ₂ O ₃	B22t	50 - 75 cm	5,9 % Fe ₂ O ₃
B3	180 - 250 cm	12,4 % Fe ₂ O ₃	B3	75 - 118 cm	5,4 % Fe ₂ O ₃

Fonte: Oliveira *et al.* (1982)

TABELA 37 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES (Ct₂, K, U e Th), SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (k), GEOLÓGICOS, GRANULOMÉTRICOS, DE SOLOS E DE USO DO SOLO DO PERFIL E-F

Ponto	47	46	45	44	43	48	49	62	63	50	51	52	61	53	54	55	56
Ct ₂ (cps)																	
K (cps)	1,0	1,3	0,7	0,7	0,9	1,2	1,4	2,3	2,1	1,7	1,5	2,6	2,9	2,8	2,7	3,4	1,9
U (cps)	0,8	0,7	0,6	0,3	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	1,4	1,5	2,2	2,4	1,7	1,7	2,1	1,3
Th (cps)	0,4	0,7	0,1	0,2	0,3	0,2	0,6	0,2	0,4	0,8	0,6	1,2	0,4	1,2	0,9	0,6	0,5
k (x 10 ⁻³ SI)	16,9	36,8	31,8	26,9	21,7	48,1	29,7	29,4	20,3	24	22,0	30,8	0,3	5,9	13,3	13,8	9,0
Geologia IG (1987)	TRp (JKβ)	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβ	JKβxPi	Pi	Pi (JKβ)	Pi (JKβ)	Pi (JKβ)
Form. Superf. (IG, 1987)	aA	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr		aAr	aAr	aAr	aAR	-	aAr	aAr	aAr	aAr
Solo (Oliveira <i>et al.</i> , 1982)	PV4	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	-	LR	LR	LR	LR
Cultura	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana	Cana	Rocha	Sem cultura	Cana	Cana	Cana	Contato	Cana	Cana	Cana	Sem cultura

TABELA 38 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES (Ct₂, K, U e Th), SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (k), GEOLÓGICOS, GRANULOMÉTRICOS, DE SOLOS E DE USO DO SOLO DO PERFIL G-H

Ponto	42	41	40	39	38	37
Ct ₂ (cps)	9,5	20,6	53,3	59,1	49,9	37,1
K (cps)	0,6	1,0	2,4	3,4	2,2	1,7
U (cps)	0,4	0,8	1,8	2,5	1,8	1,3
Th (cps)	0,4	0,4	1,6	2,1	0,9	0,8
k (x 10 ⁻³ SI)	12,4	15,2	3,0	4,6	3,2	7,6
Geologia (IG ,1987)	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr	aAr
Formações Superficiais (IG, 1987)	JKβ	Pc	Pi	Pi	Pi	Pi (JKβ)
Solo (Oliyeira <i>et al.</i> , 1982)	LR	LE1	LE1	LE1	LE1	LE1
Cultura	Cana	Cana	Cana	Cana	Sem cultura	Reflorestamento

TABELA 39 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS TERRESTRES (Ct₂, K, U e Th), SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (k), GEOLÓGICOS, GRANULOMÉTRICOS, DE SOLOS E DE USO DO SOLO DO PERFIL I-J

Ponto	57	58	59	60
Ct ₂ (cps)	42,5	48,7	32,5	23,2
K (cps)	1,6	2,1	1,5	1,4
U (cps)	1,6	1,5	1,5	0,8
Th (cps)	0,8	1,5	0,6	0,5
k (x 10 ⁻³ SI)	9,94	20,9	24,9	33,4
Geologia (IG ,1987)	Pi	JKβ	JKβ	JKβ
Granulometria (IG, 1987)	aAr	aAr	AAr	aAr
Solo (Oliveira <i>et al.</i> , 1982)	LE-1	LR	LR	LR
Cultura	Cana	Cana	Cana	Sem cultura

FIGURA 53 - PERFIL A-B (CONTAGEM TOTAL)

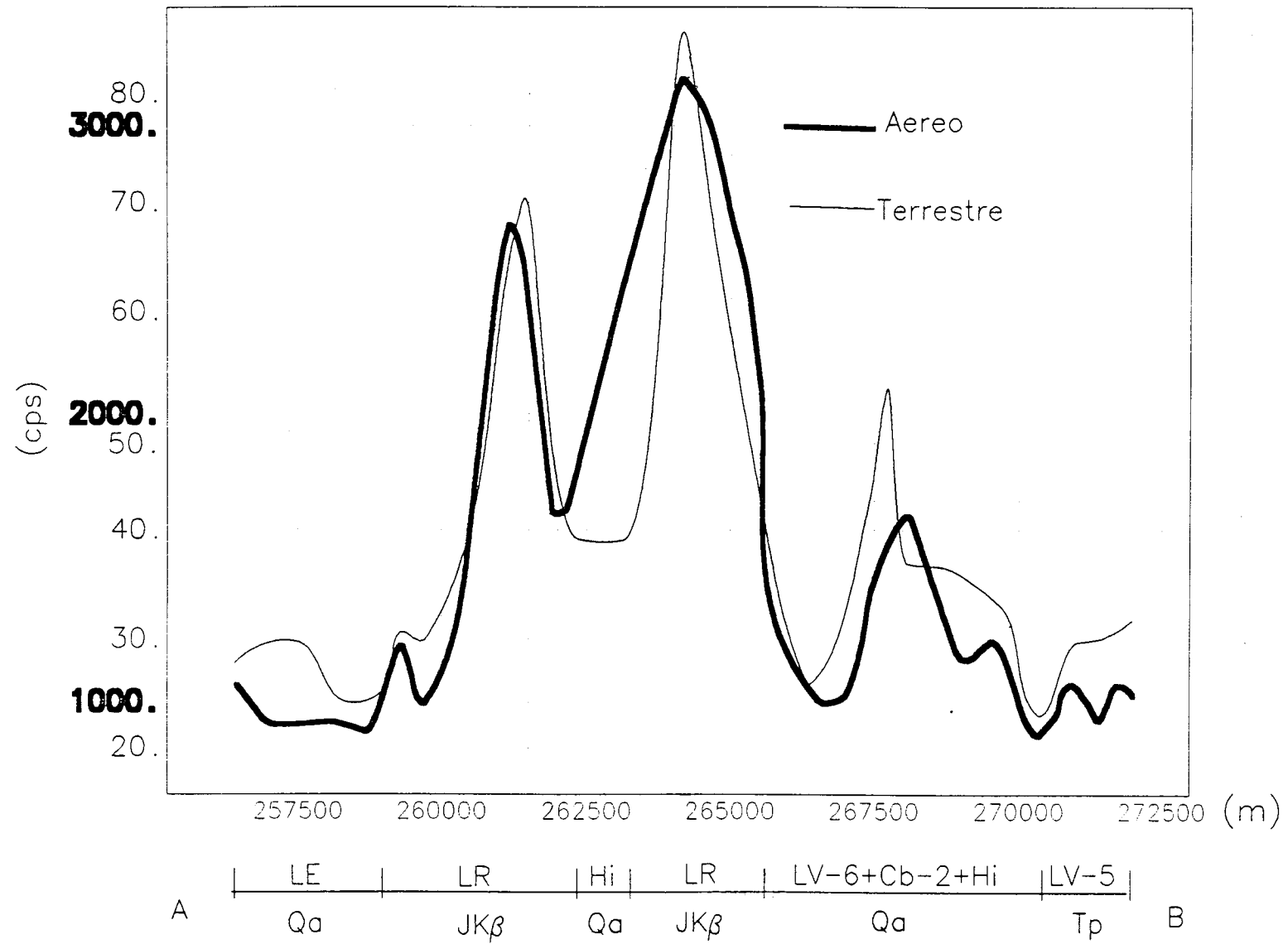


FIGURA 54 - PERFIL A-B (POTÁSSIO)

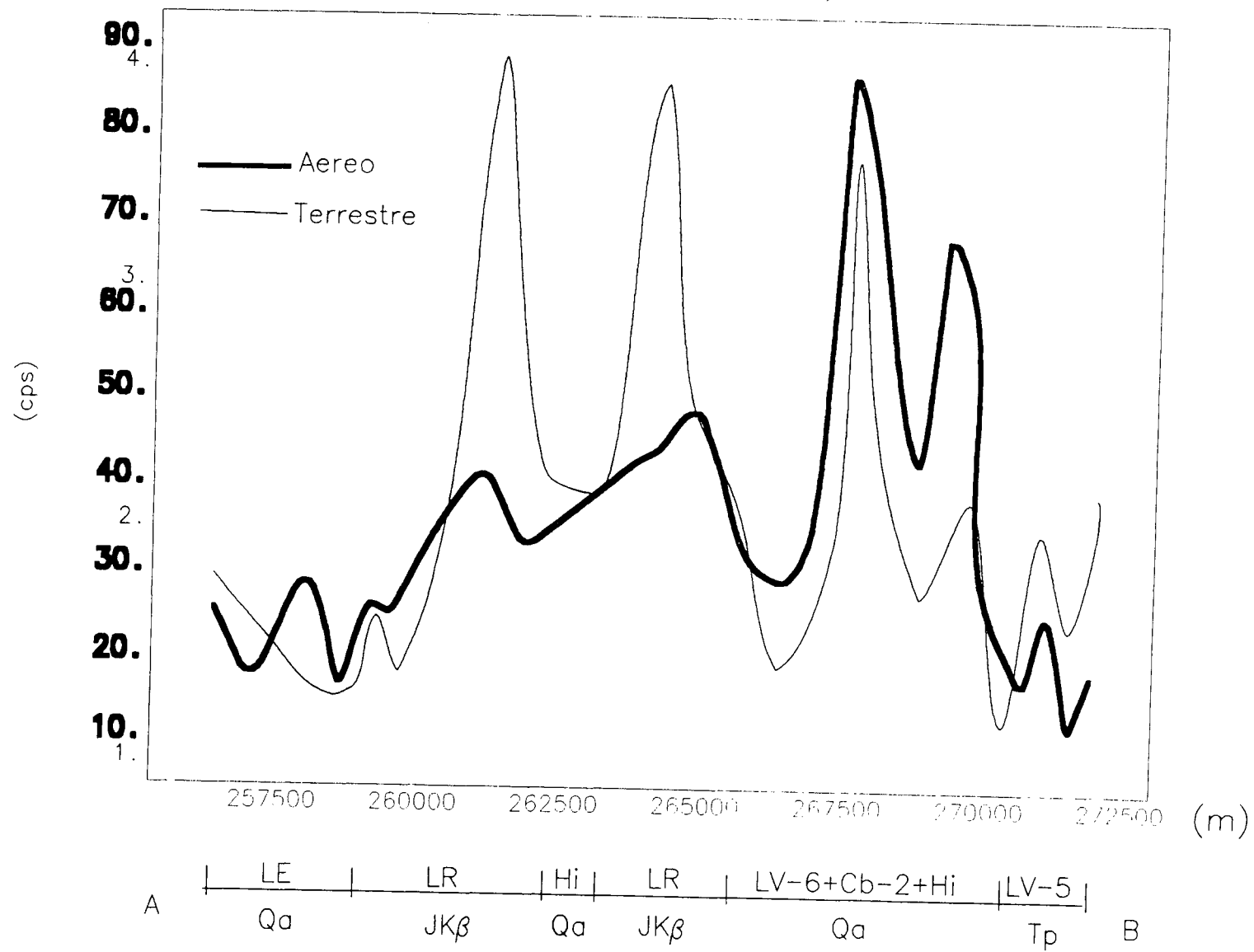


FIGURA 55 - PERFIL A-B (URÂNIO)

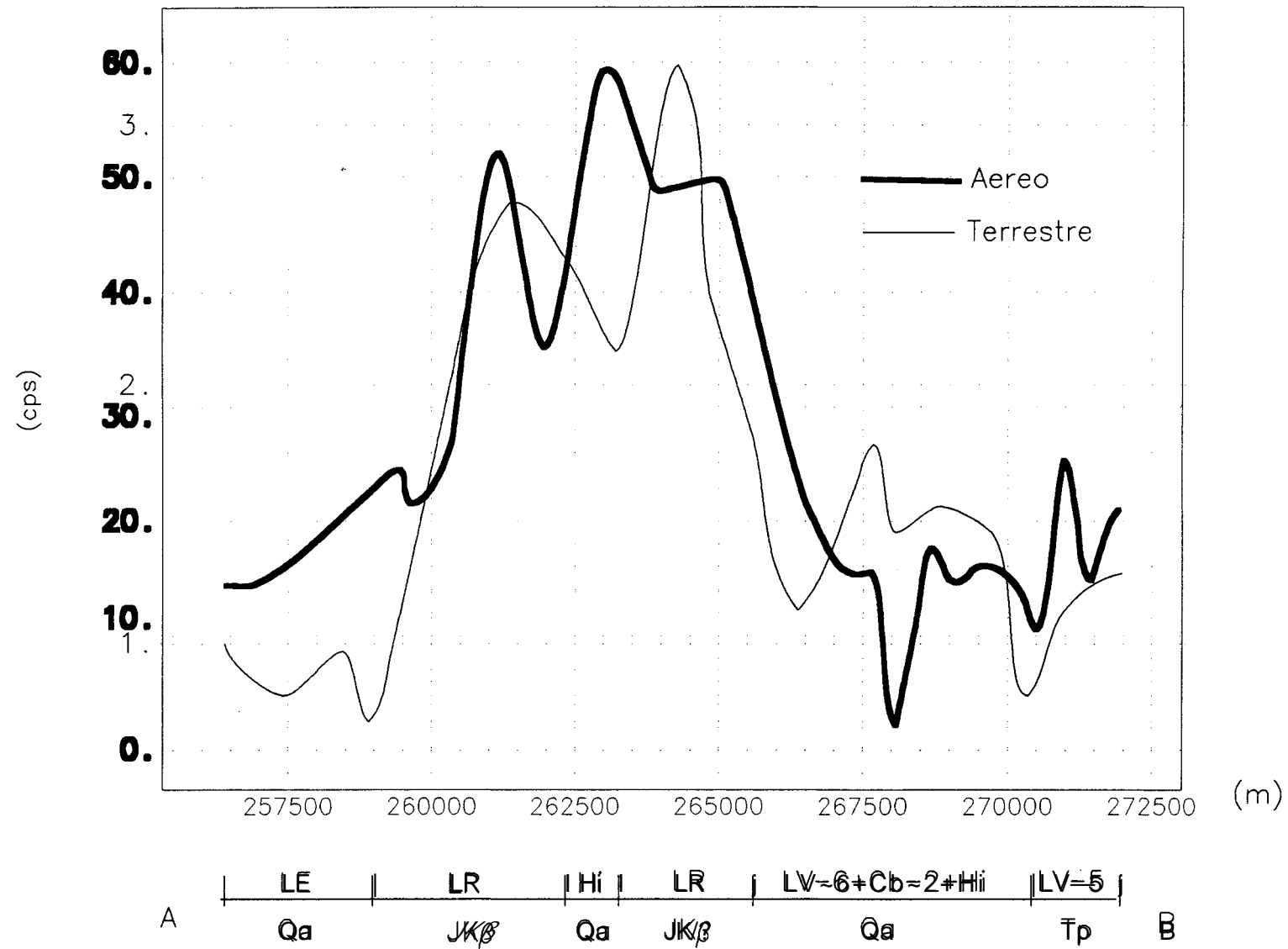


FIGURA 56 - PERFIL A-B (TÓRIO)

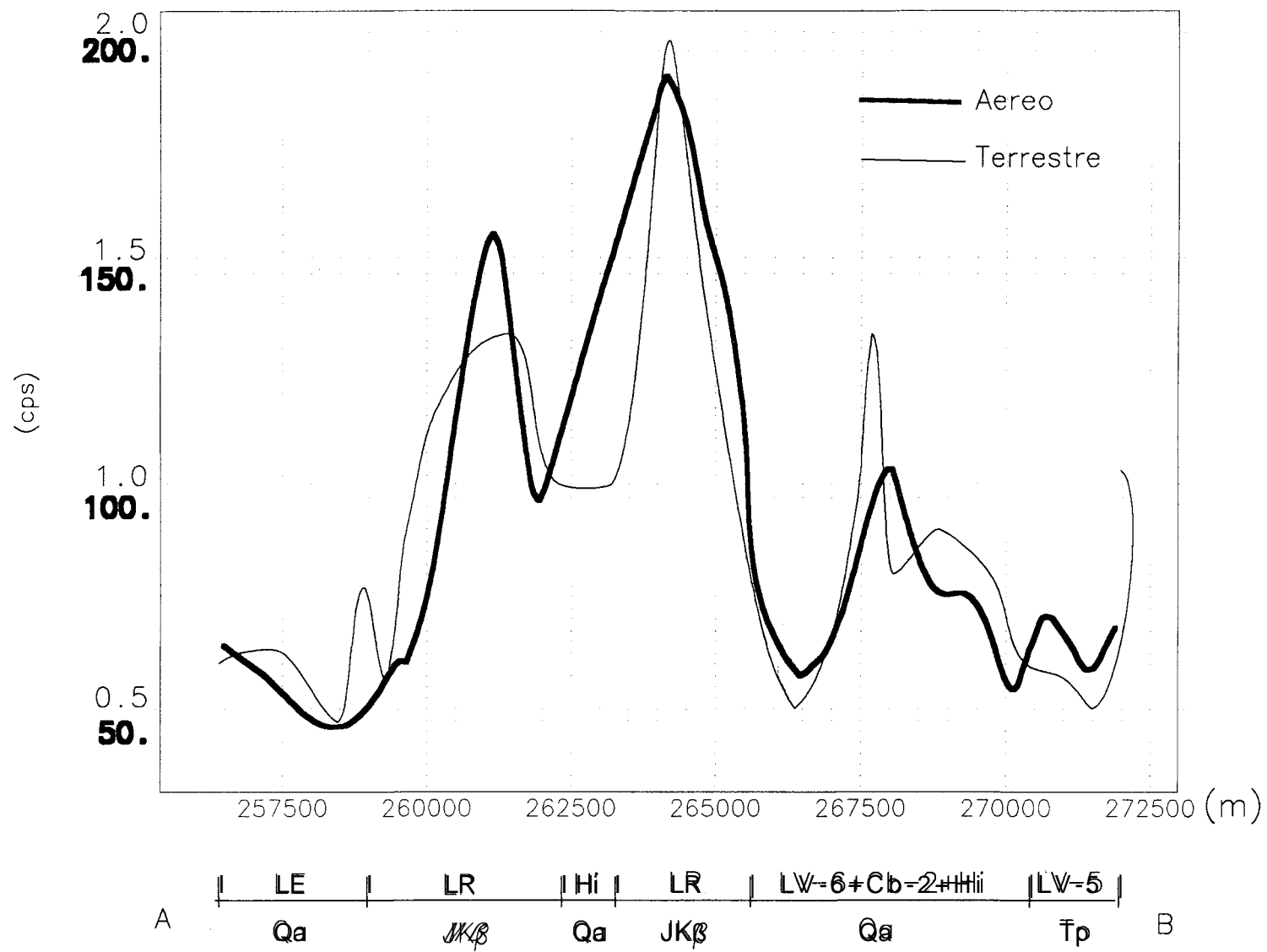


FIGURA 57 - PERFIL A-B (SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA)

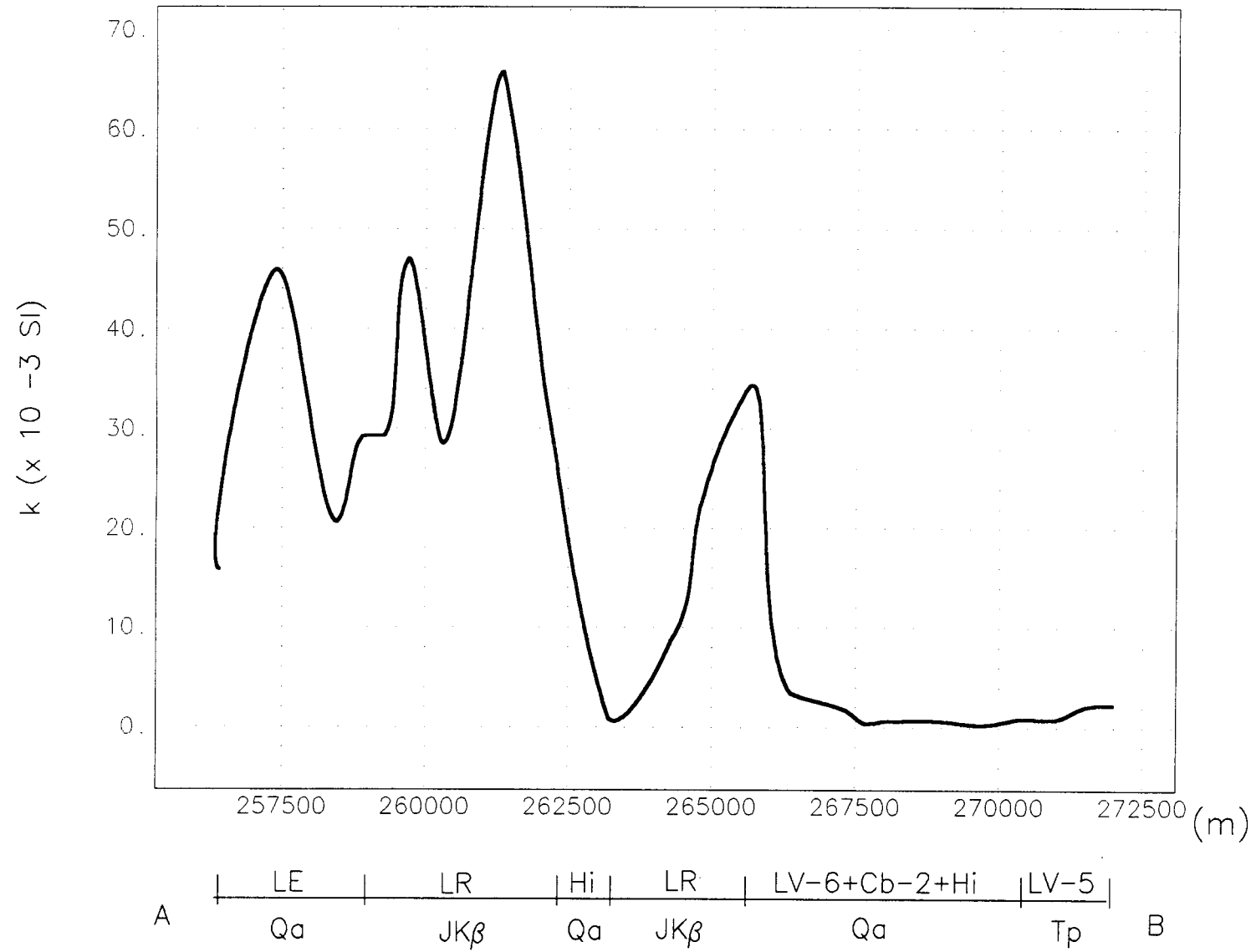


FIGURA 58 - PERFIL C-D (CONTAGEM TOTAL)

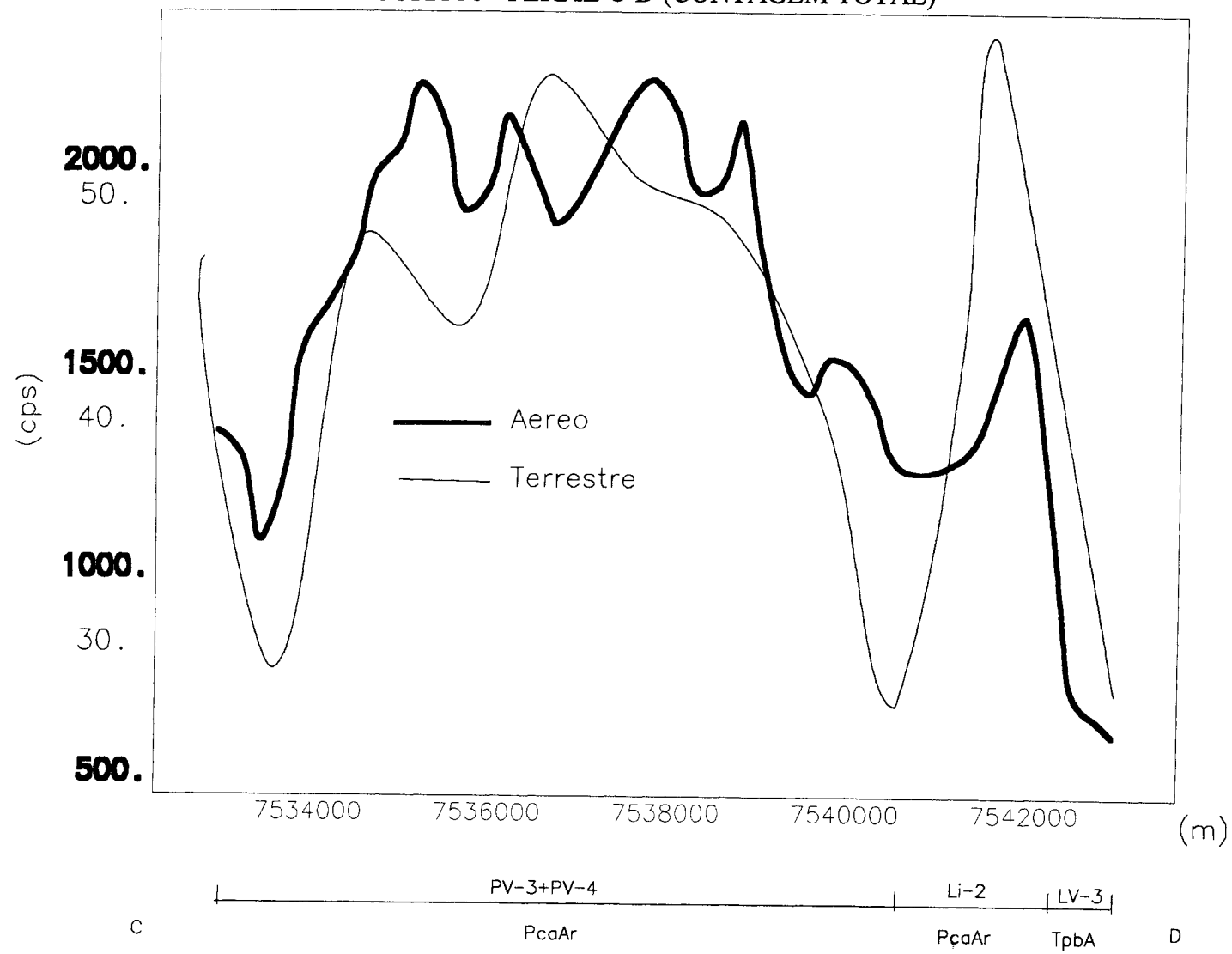


FIGURA 59 - PERFIL C-D (POTÁSSIO)

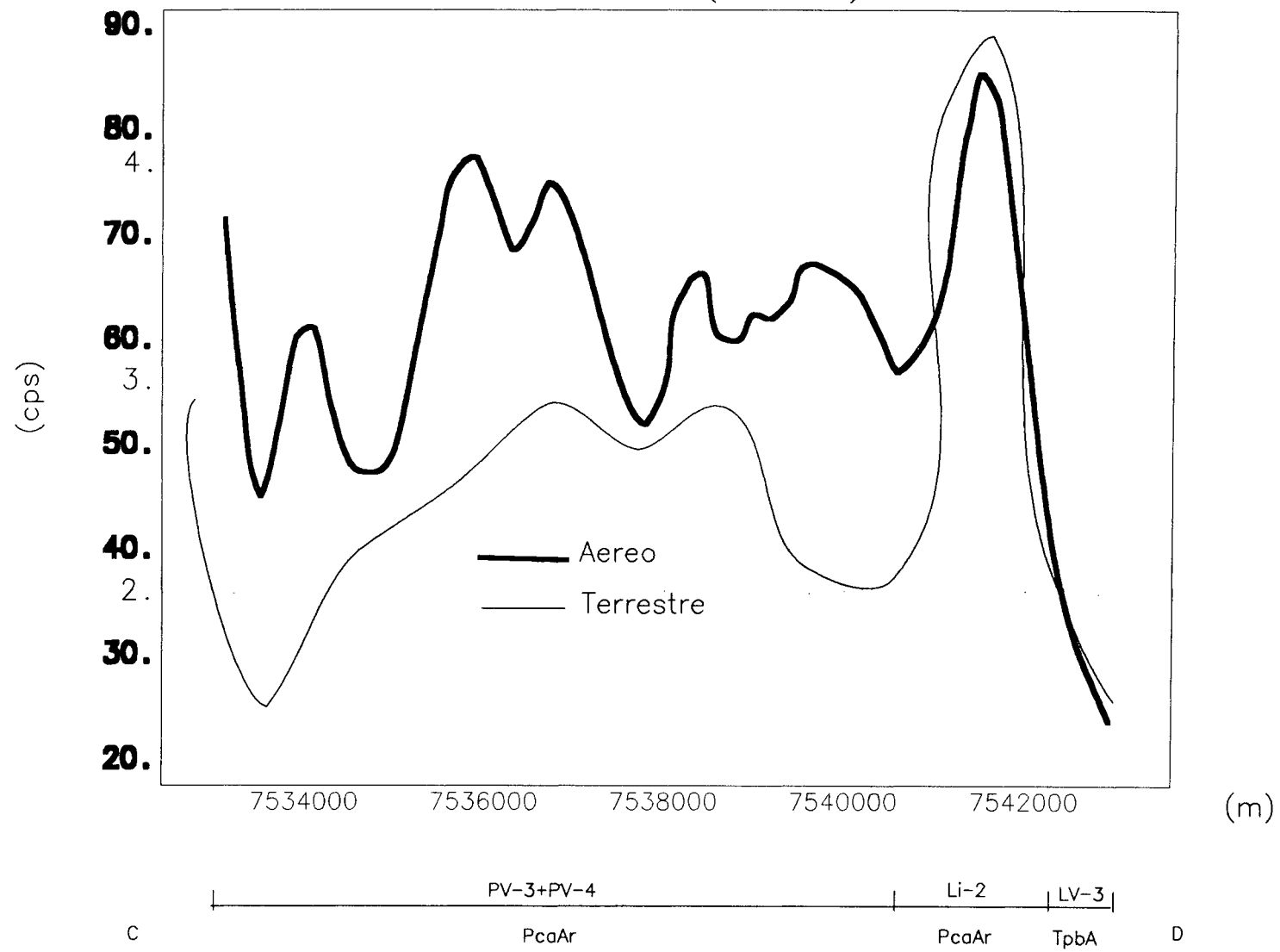


FIGURA 60 - PERFIL C-D (URÂNIO)

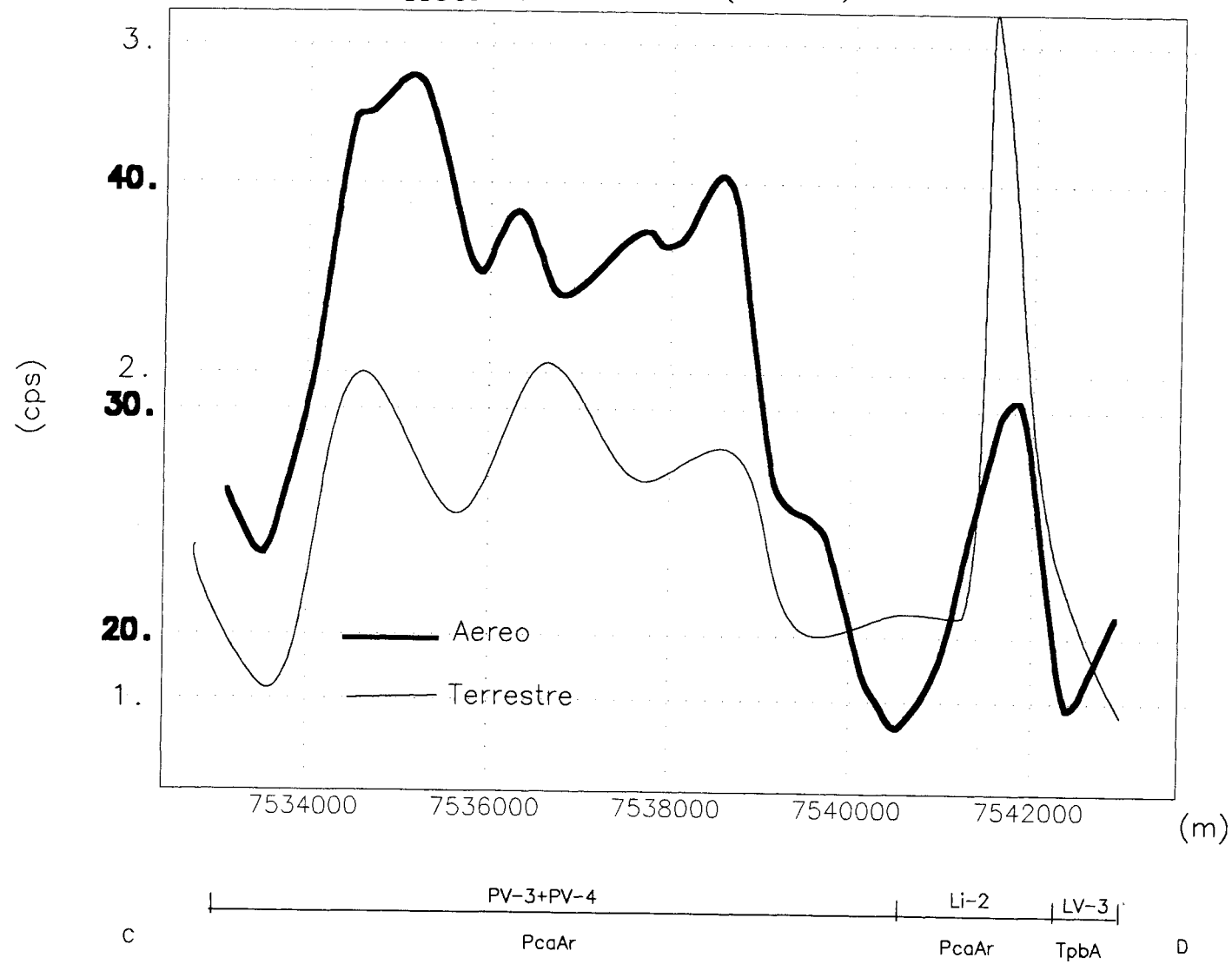
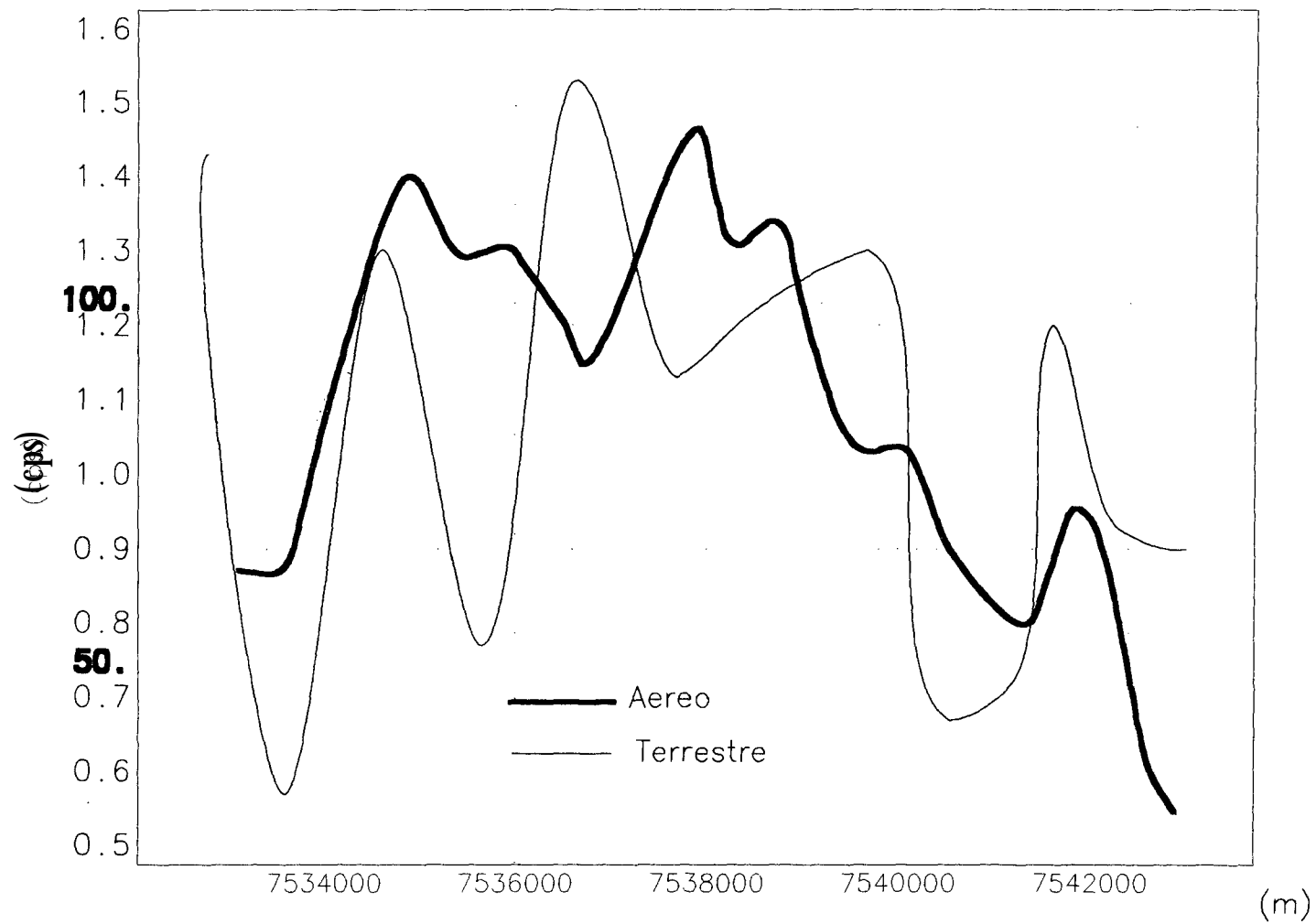


FIGURA 61 - PERFIL C-D (TÓRIO)



c |-----| PV-33-PV-4 |-----| Li=2 |-----| PV-33 |-----| D
 PCCAr PCCAr PCCAr PCCAr

FIGURA 62 - PERFIL C-D (SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA)

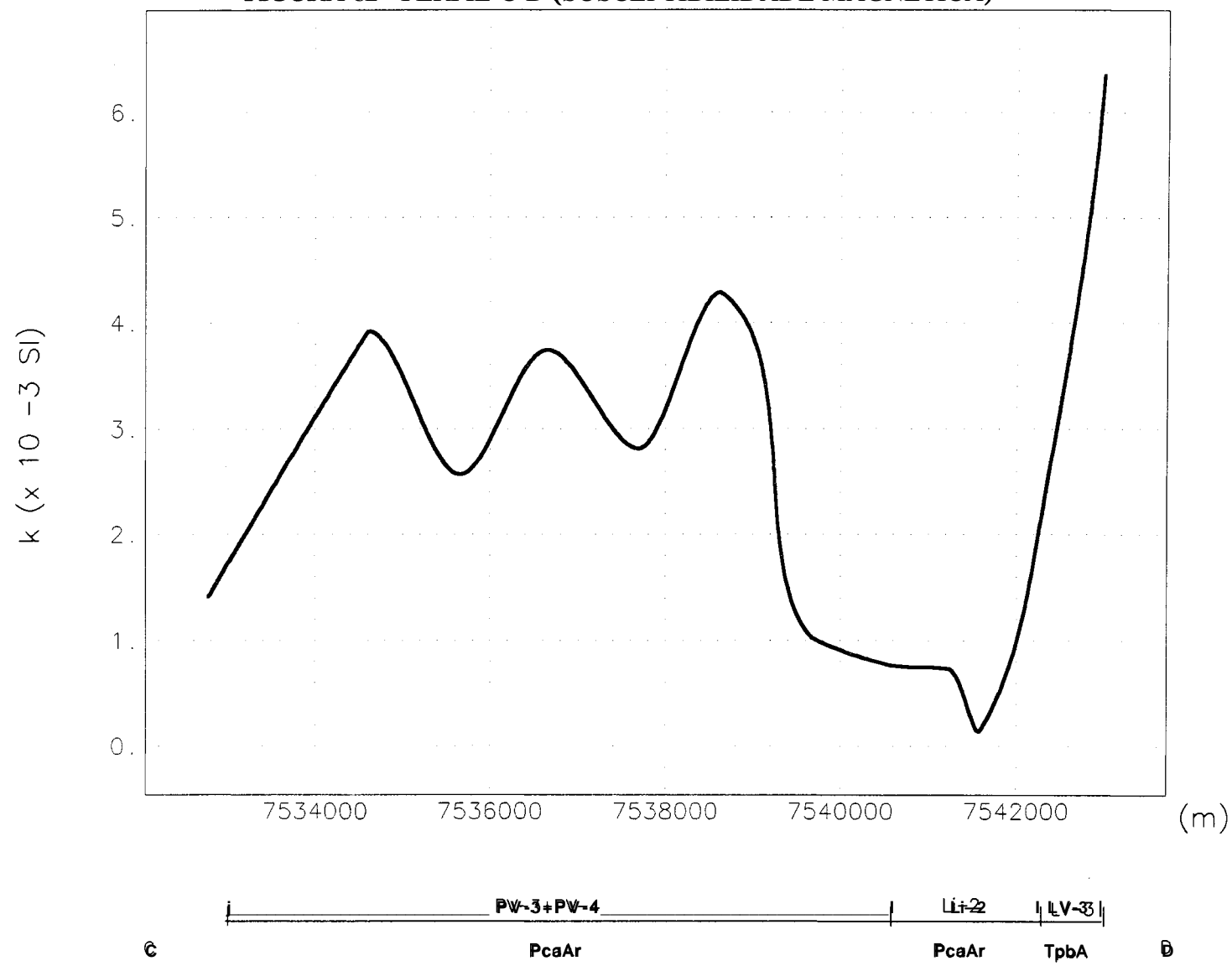


FIGURA 63 - PERFIL E-F (CONTAGEM TOTAL)

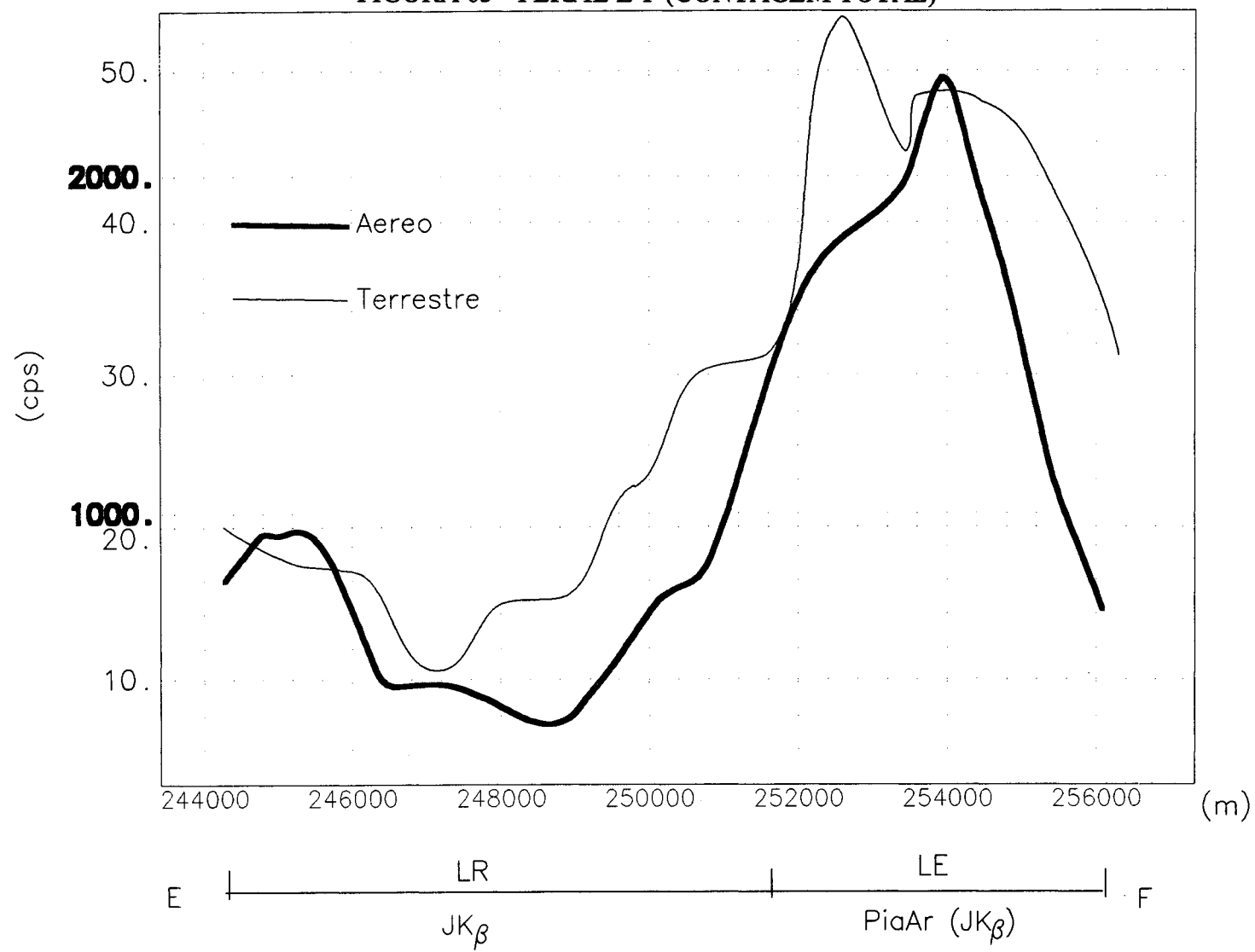


FIGURA 64 - PERFIL E-F (POTÁSSIO)

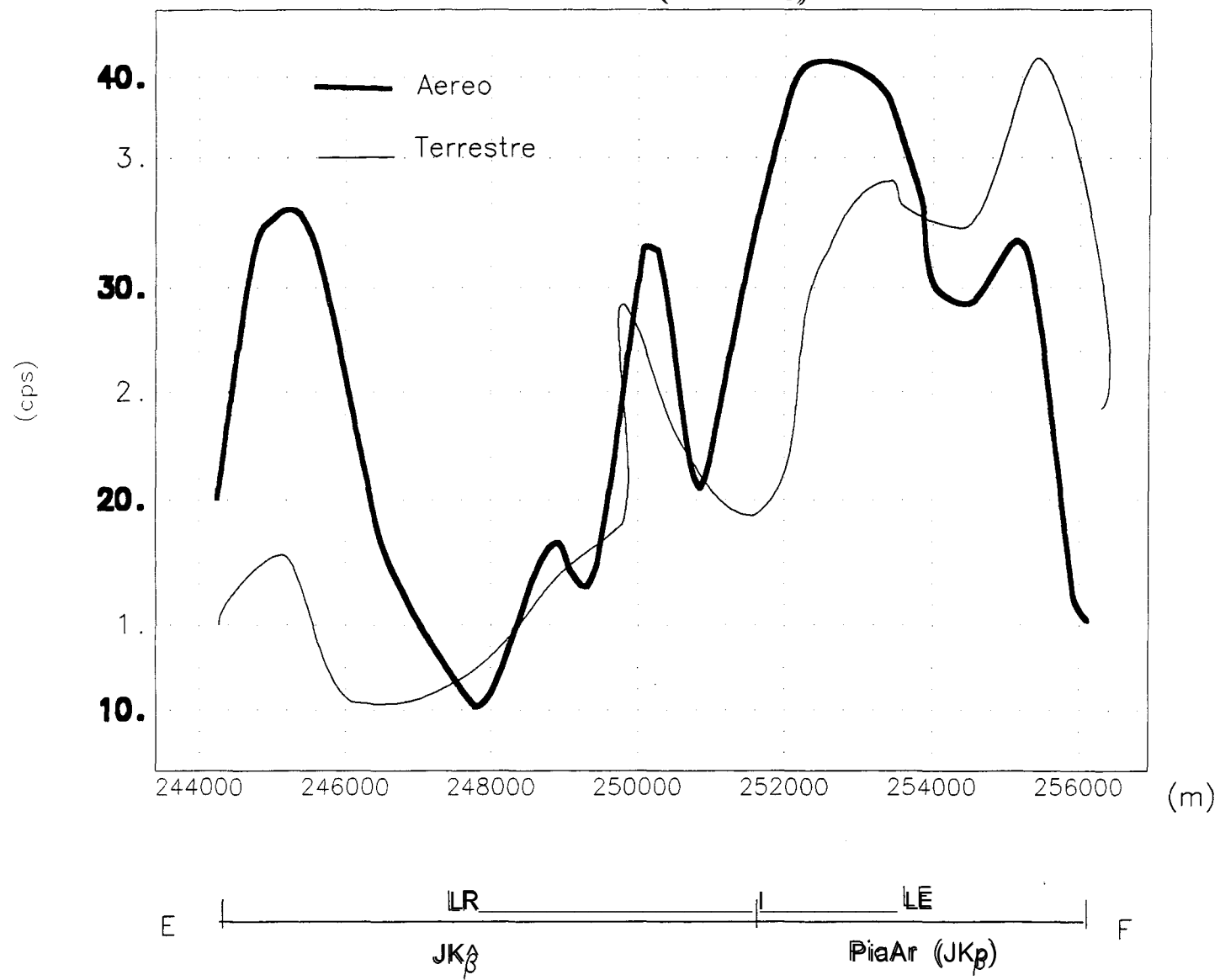
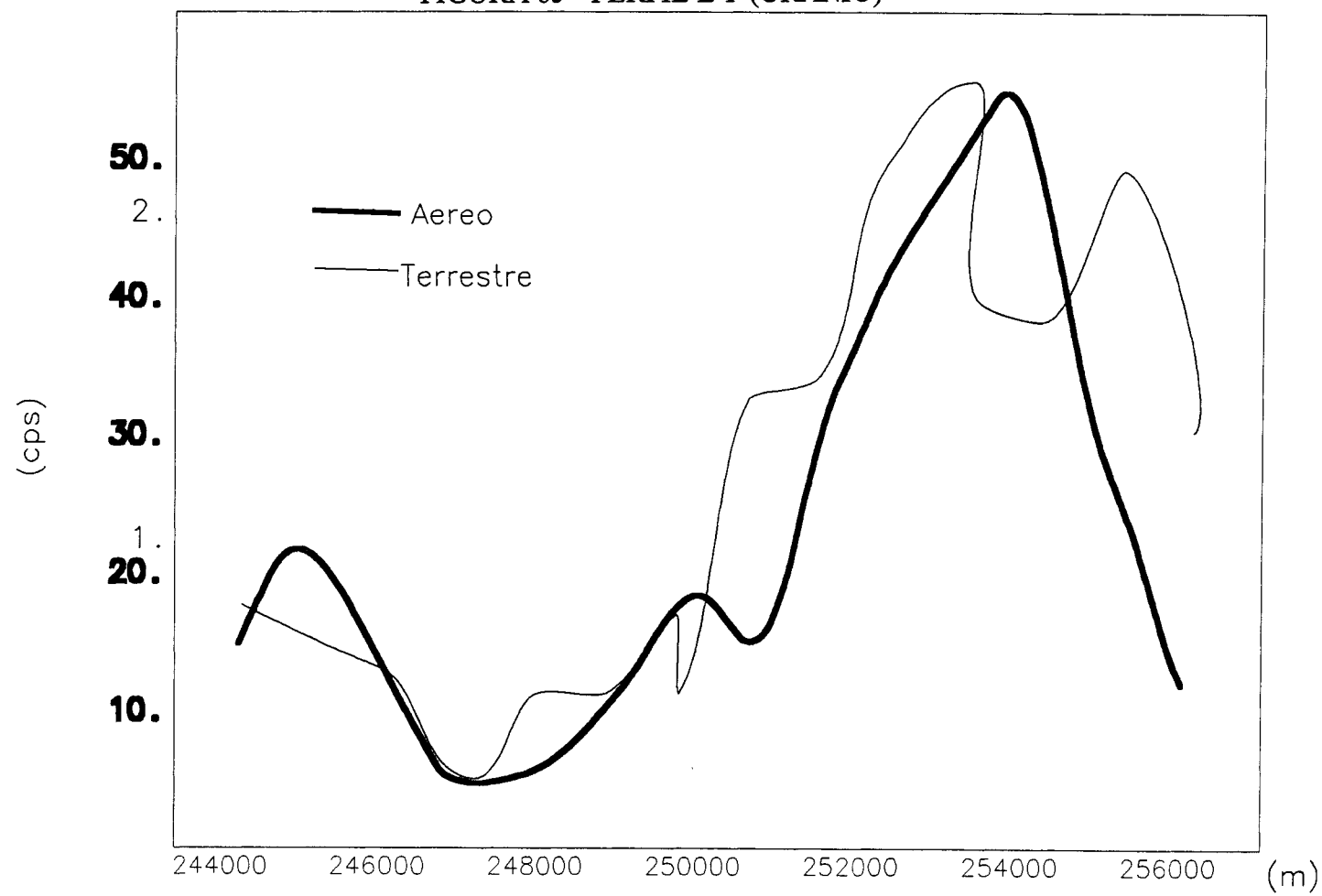


FIGURA 65 - PERFIL E-F (URÂNIO)



E | LR | LE | F
 JK_{β} $PiaAr (JK_{\beta})$

FIGURA 66 - PERFIL E-F (TÓRIO)

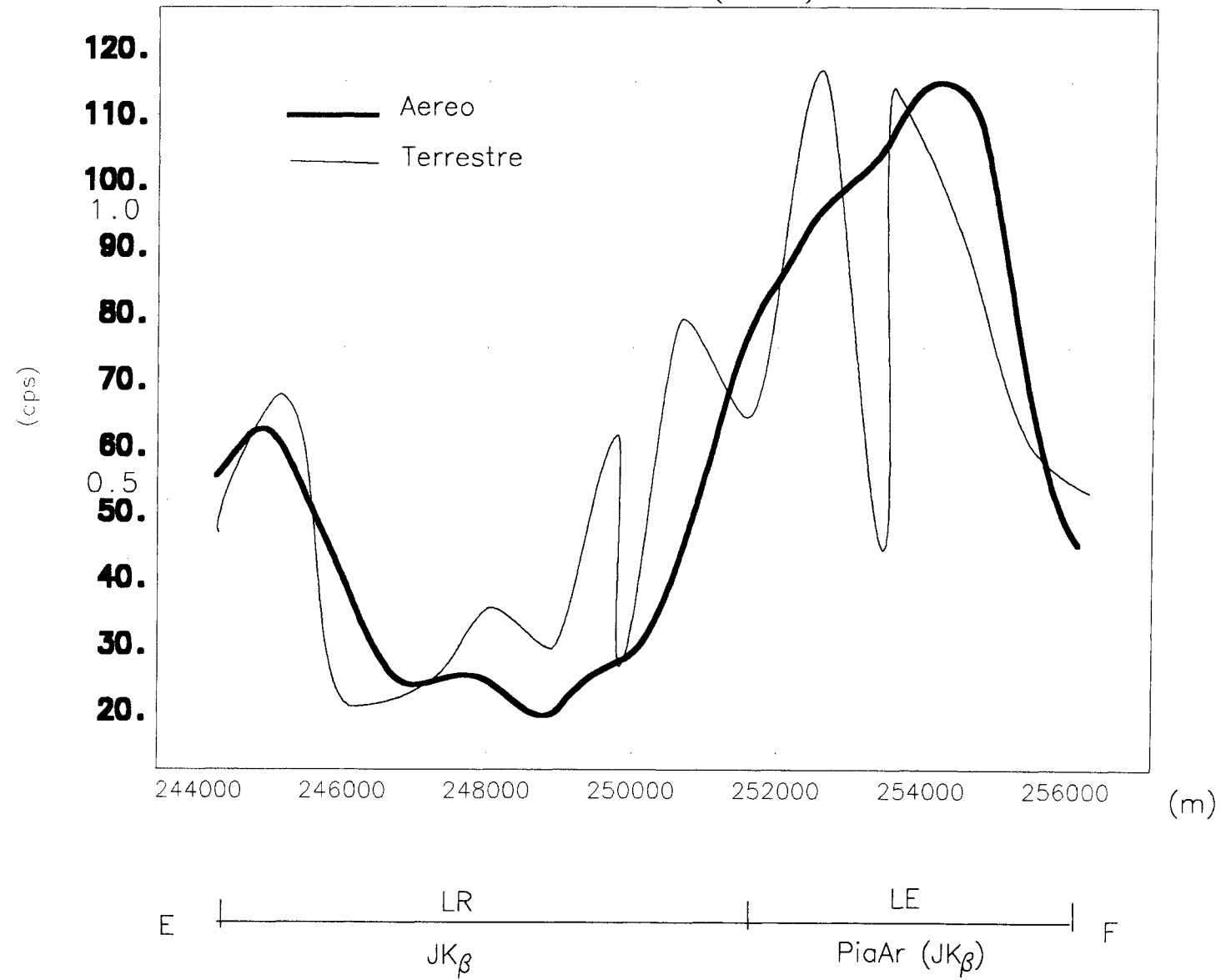


FIGURA 66 - PERFIL E-F (TÓRIO)

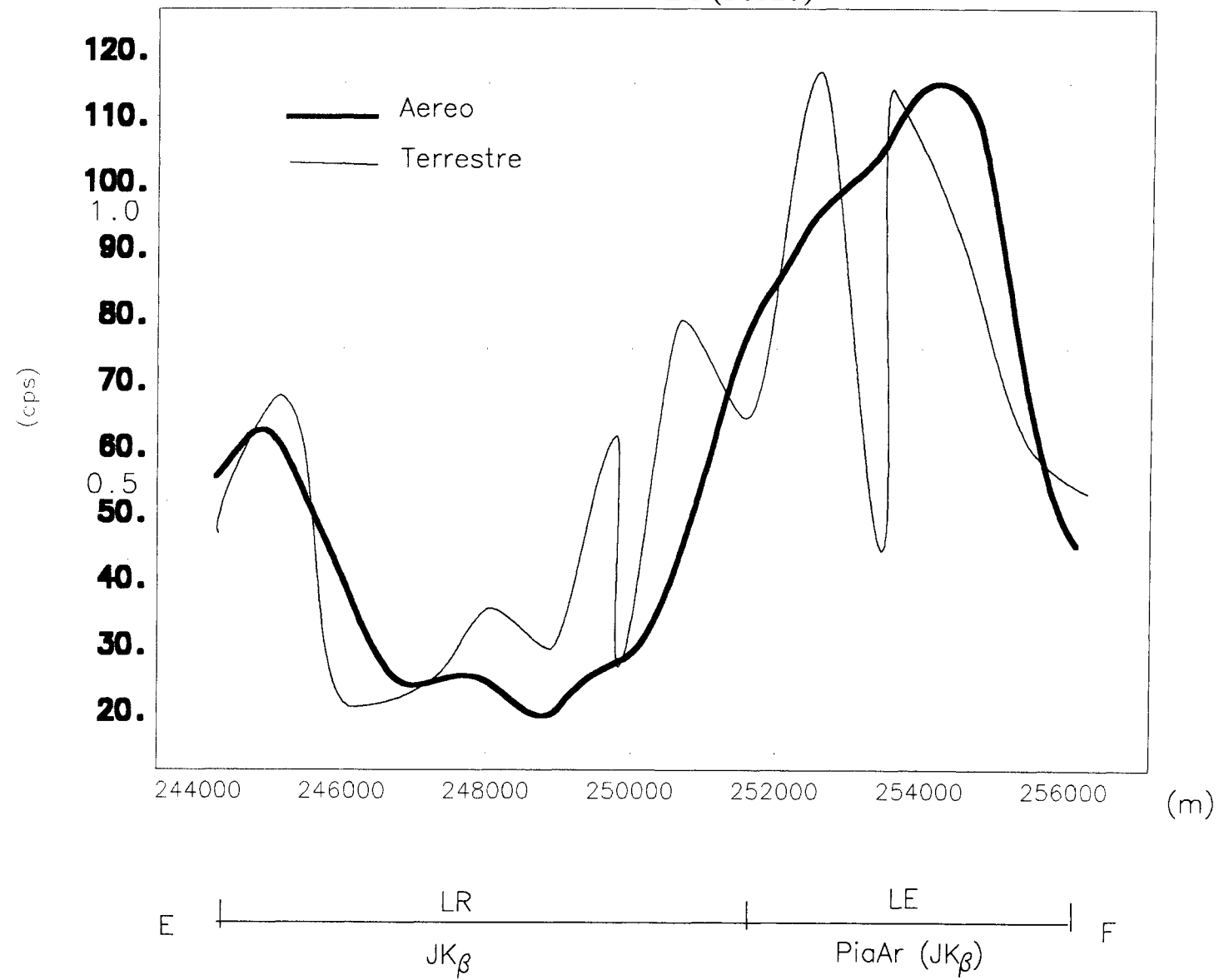
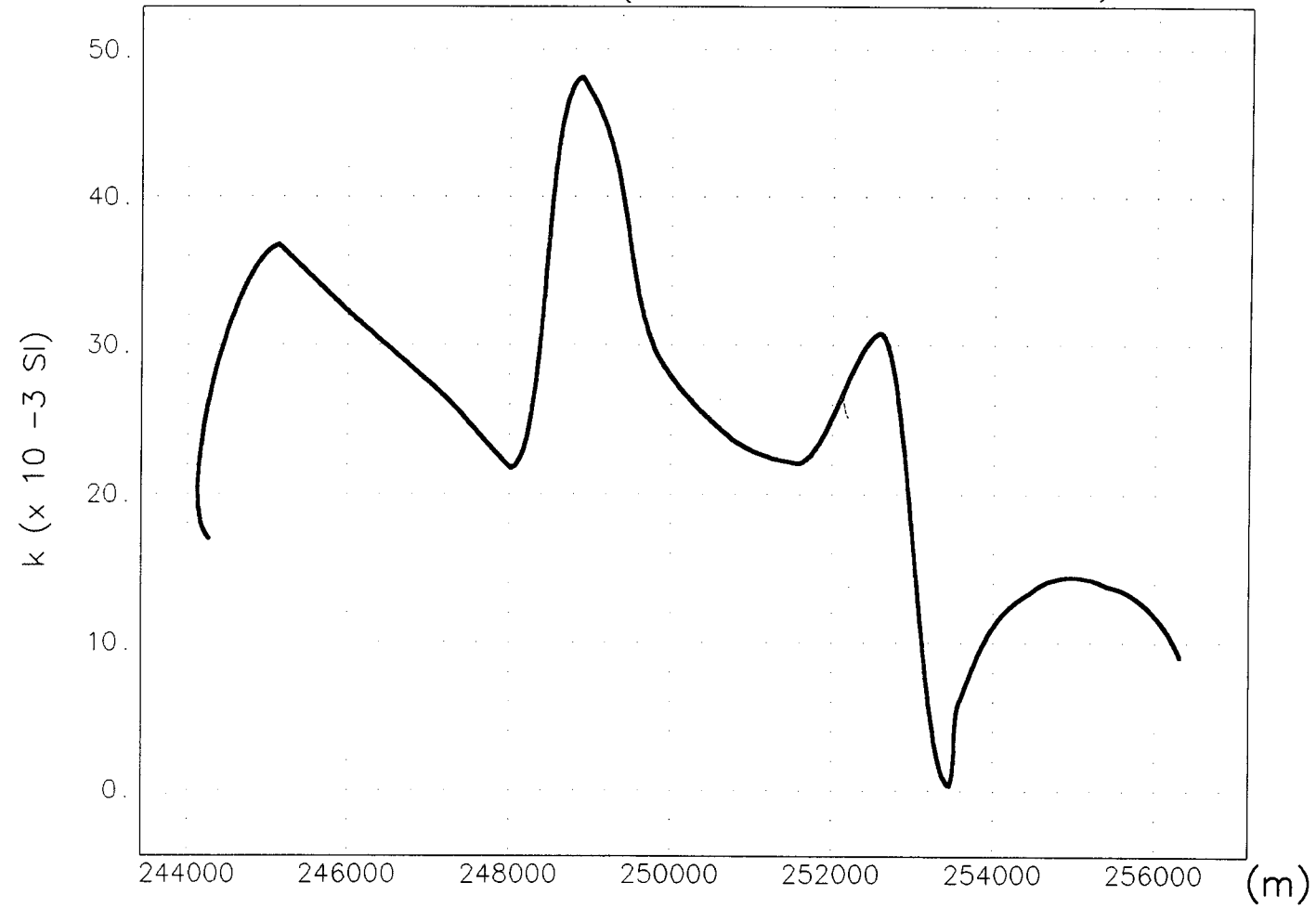
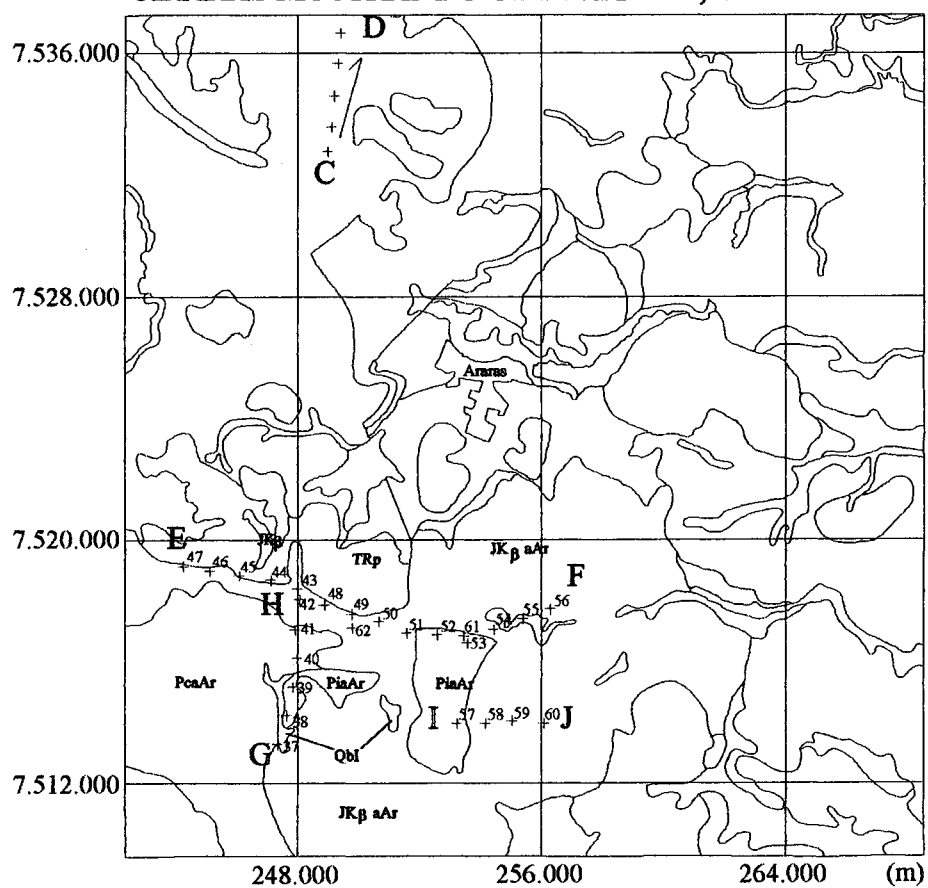


FIGURA 67 - PERFIL E-F (SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA)



E |----- LR -----| LE |----- F
 JK_β PiaAr (JK_β)

FIGURA 68 - MAPA DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS DE ARARAS MOSTRANDO OS PERFIS E-F, G-H e I-J



Escala 1 : 250.000

+ Pontos de leitura da gamaespectrometria
e da susceptibilidade magnética

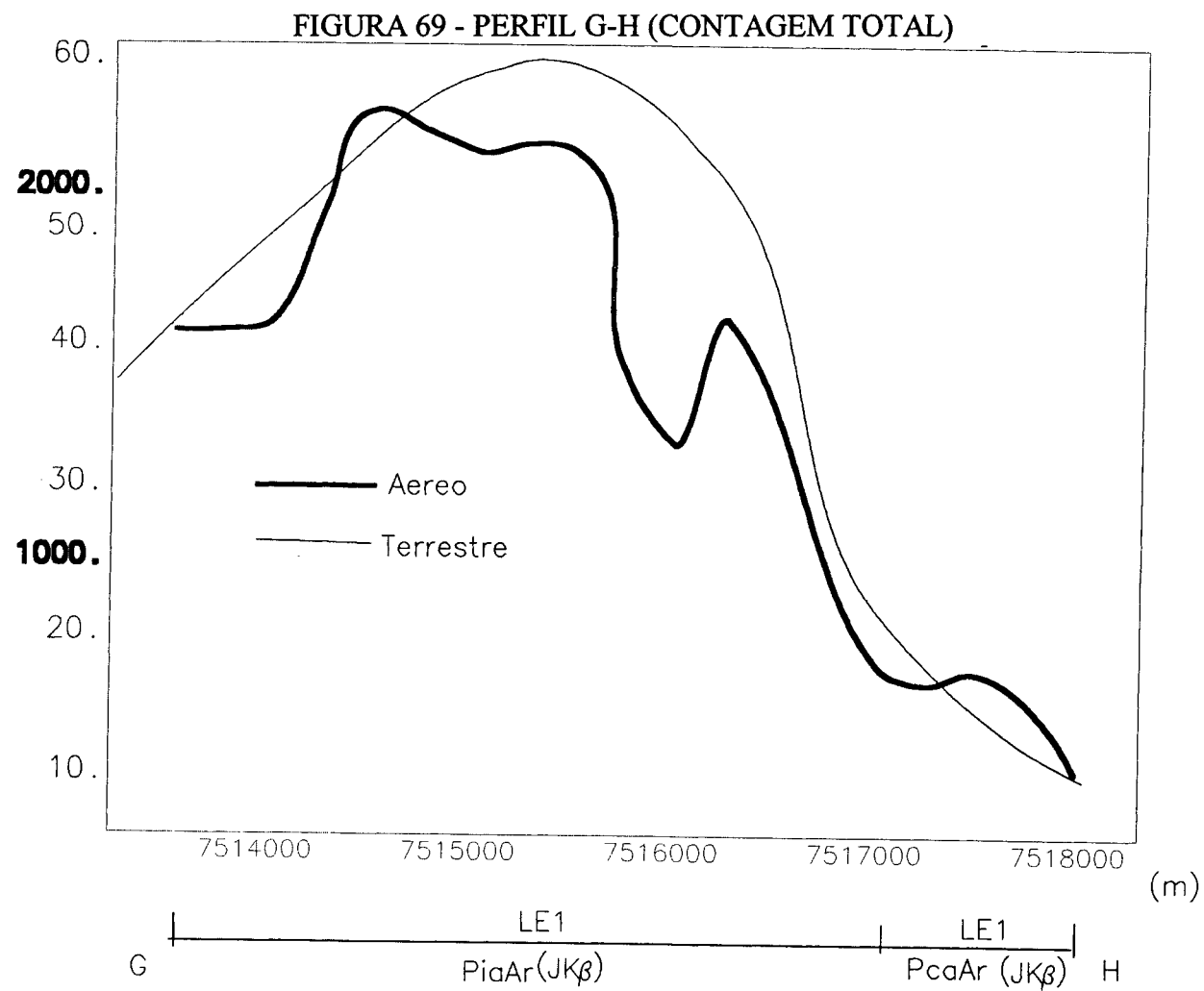
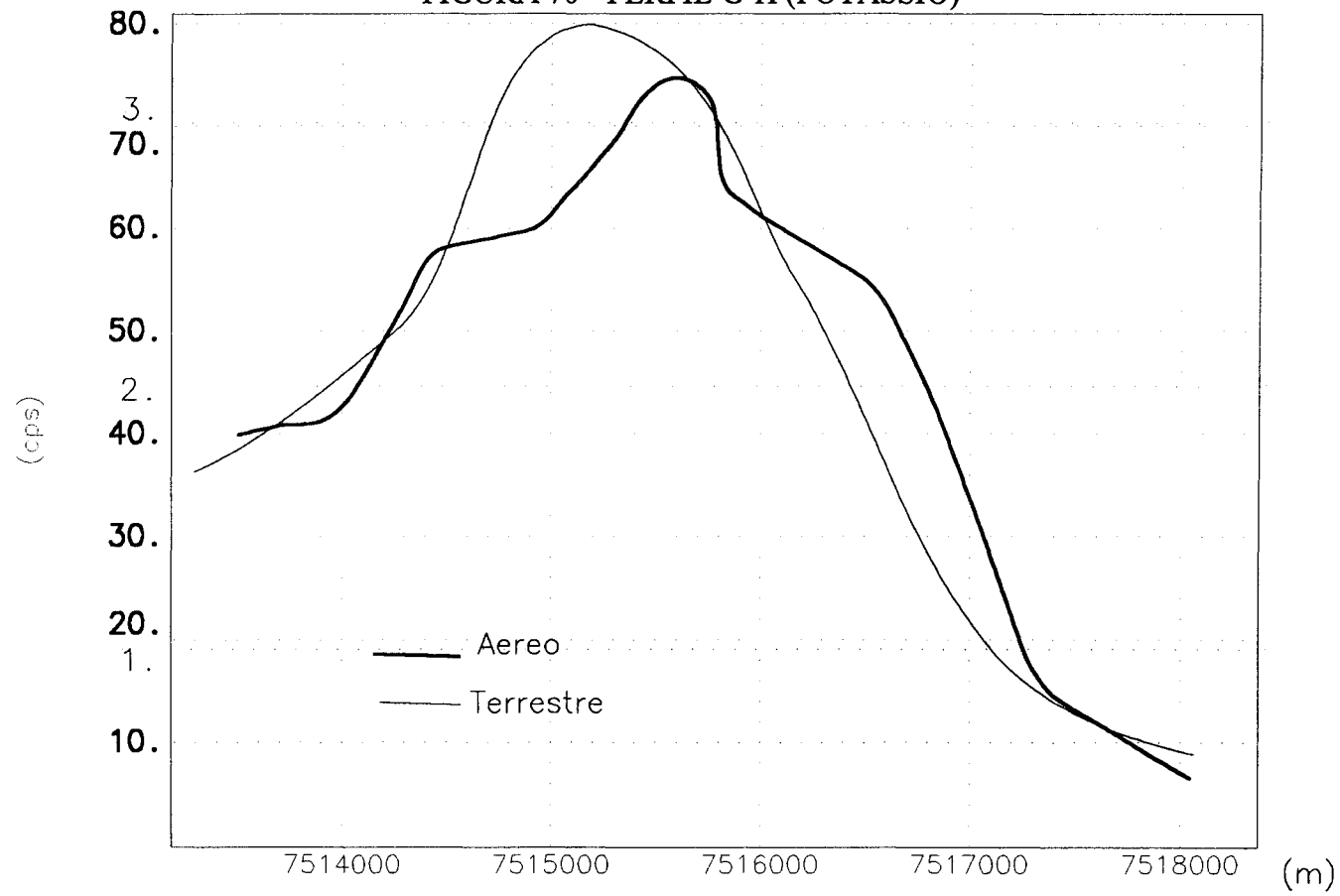
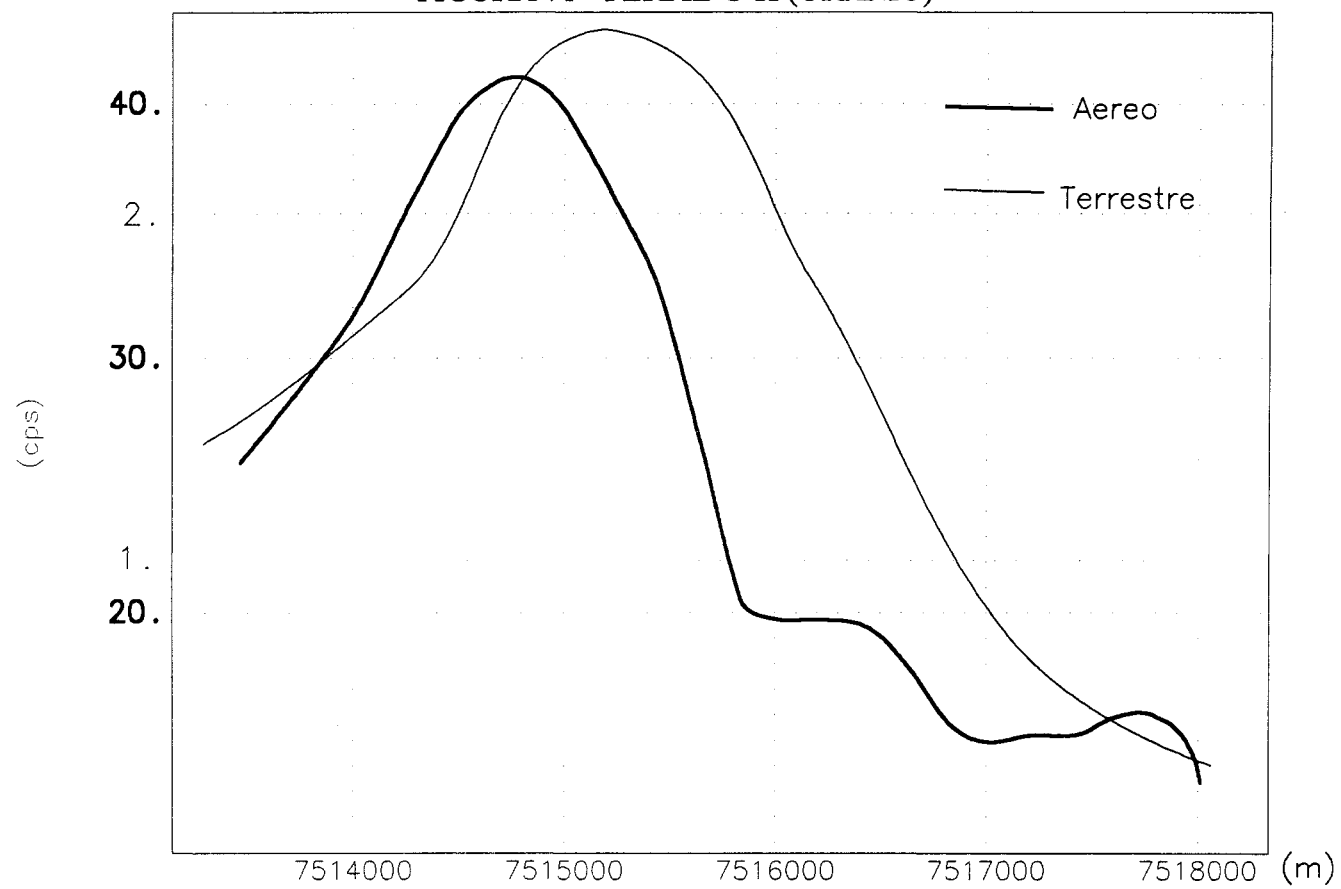


FIGURA 70 - PERFIL G-H (POTÁSSIO)



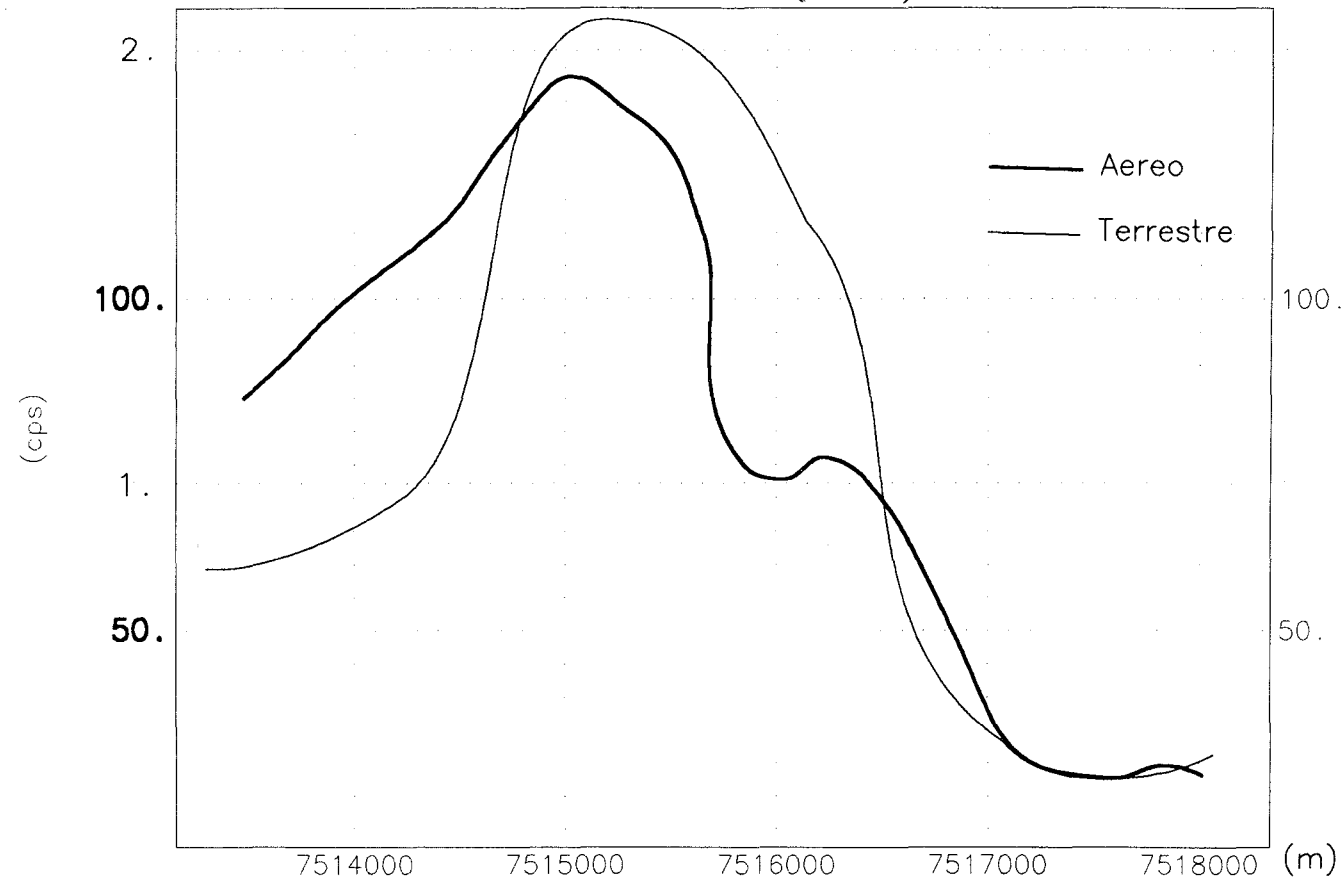
G ————— LE1 ————— LE1 ————— H
 PiaAr(JK β) PcaAr (JK β)

FIGURA 71 - PERFIL G-H (URÂNIO)



G ————— LE1 ————— LE1 ————— H
 P_{id}Ar(JK β) P_{ca}Ar(JK β)

FIGURA 72 - PERFIL G-H (TÓRIO)



LE1
LE1

PlaAr (JKS)
PcaAr (JKS)

G
H

FIGURA 73 - PERFIL G-H (SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA)

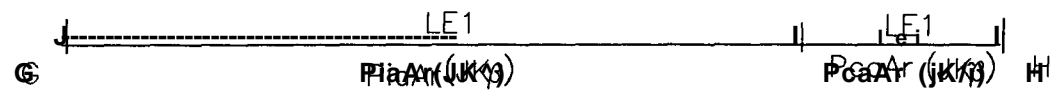
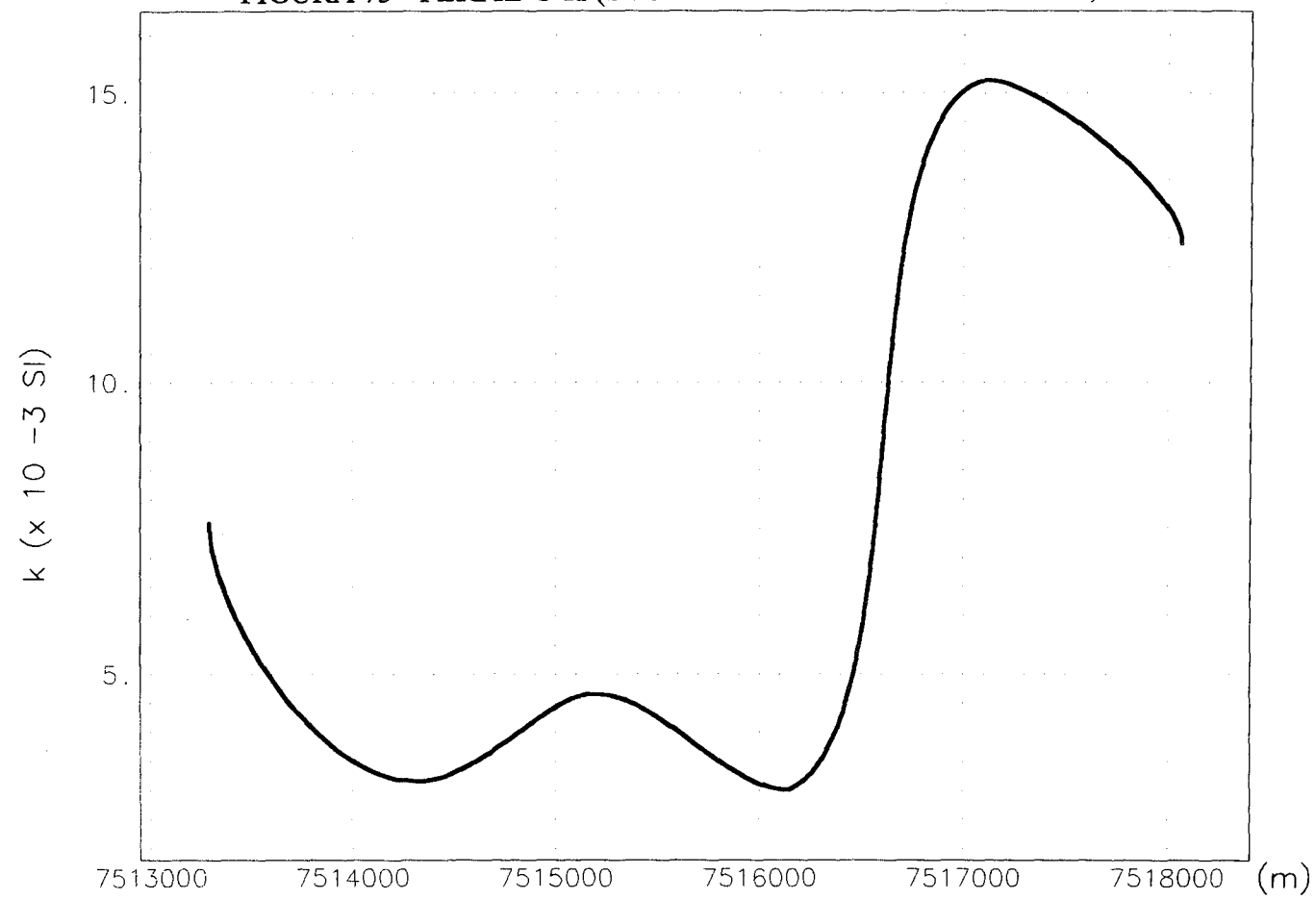


FIGURA 74 - PERFIL I-J (CONTAGEM TOTAL)

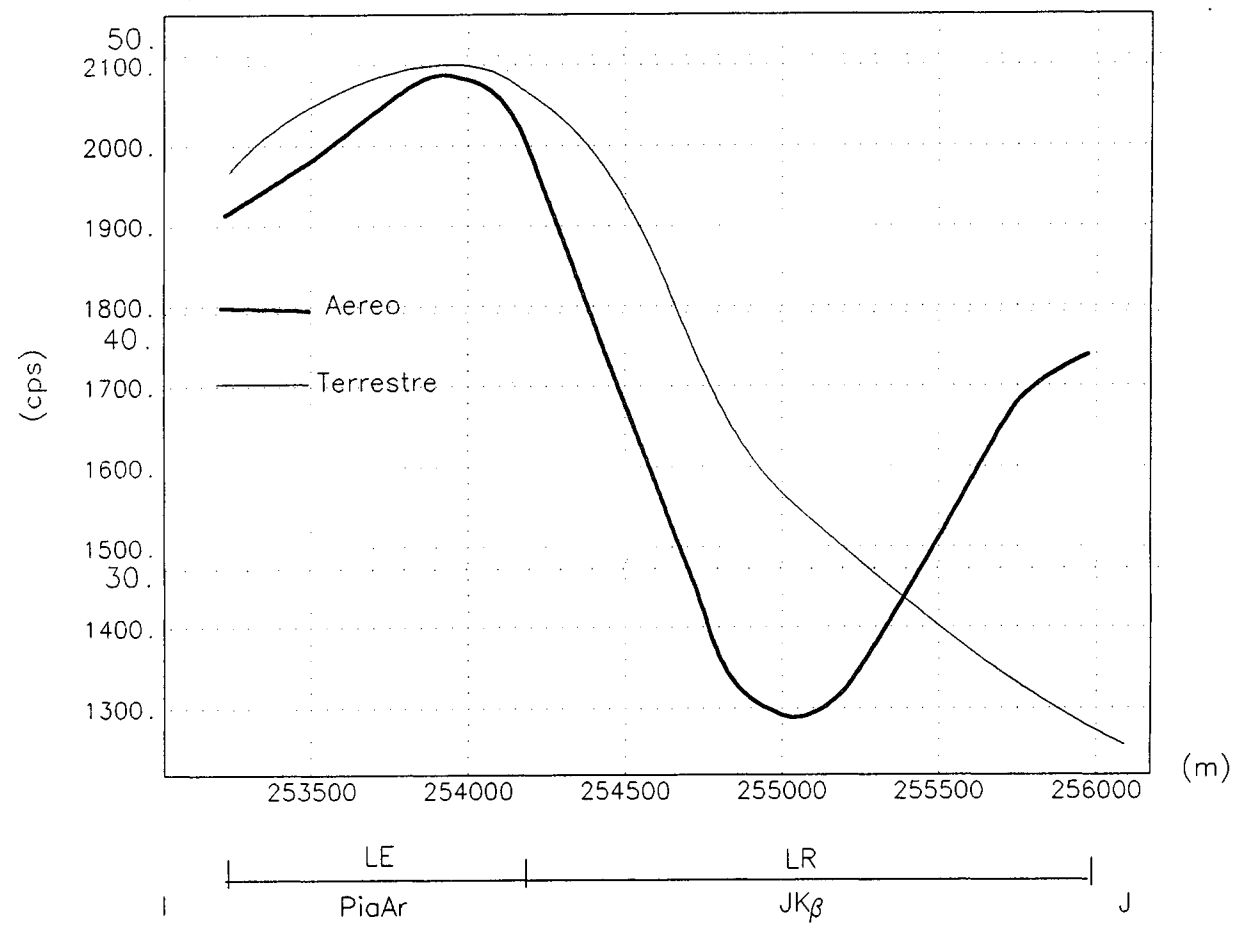


FIGURA 75 - PERFIL I-J (POTÁSSIO)

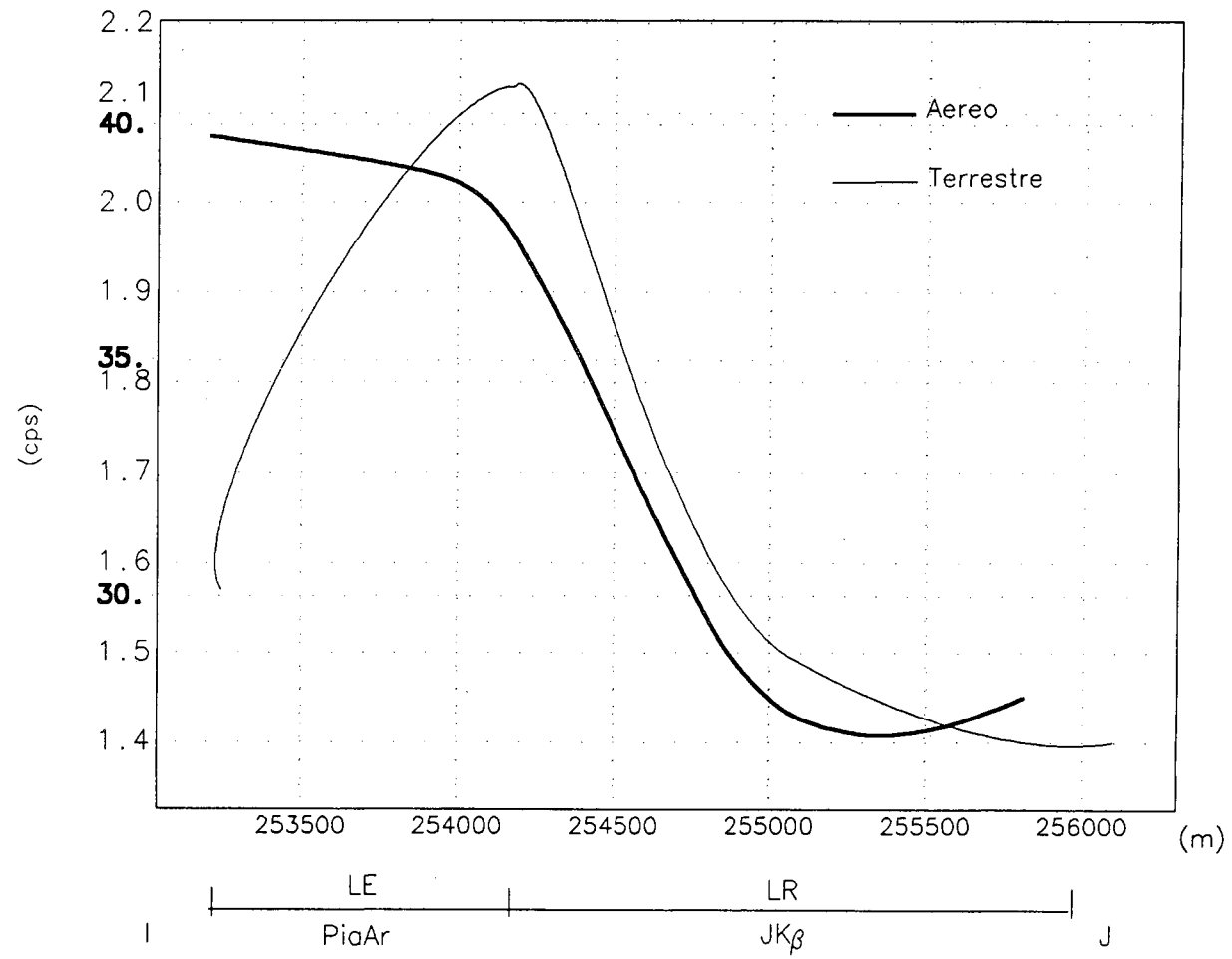


FIGURA 76 - PERFIL I-J (URÂNIO)

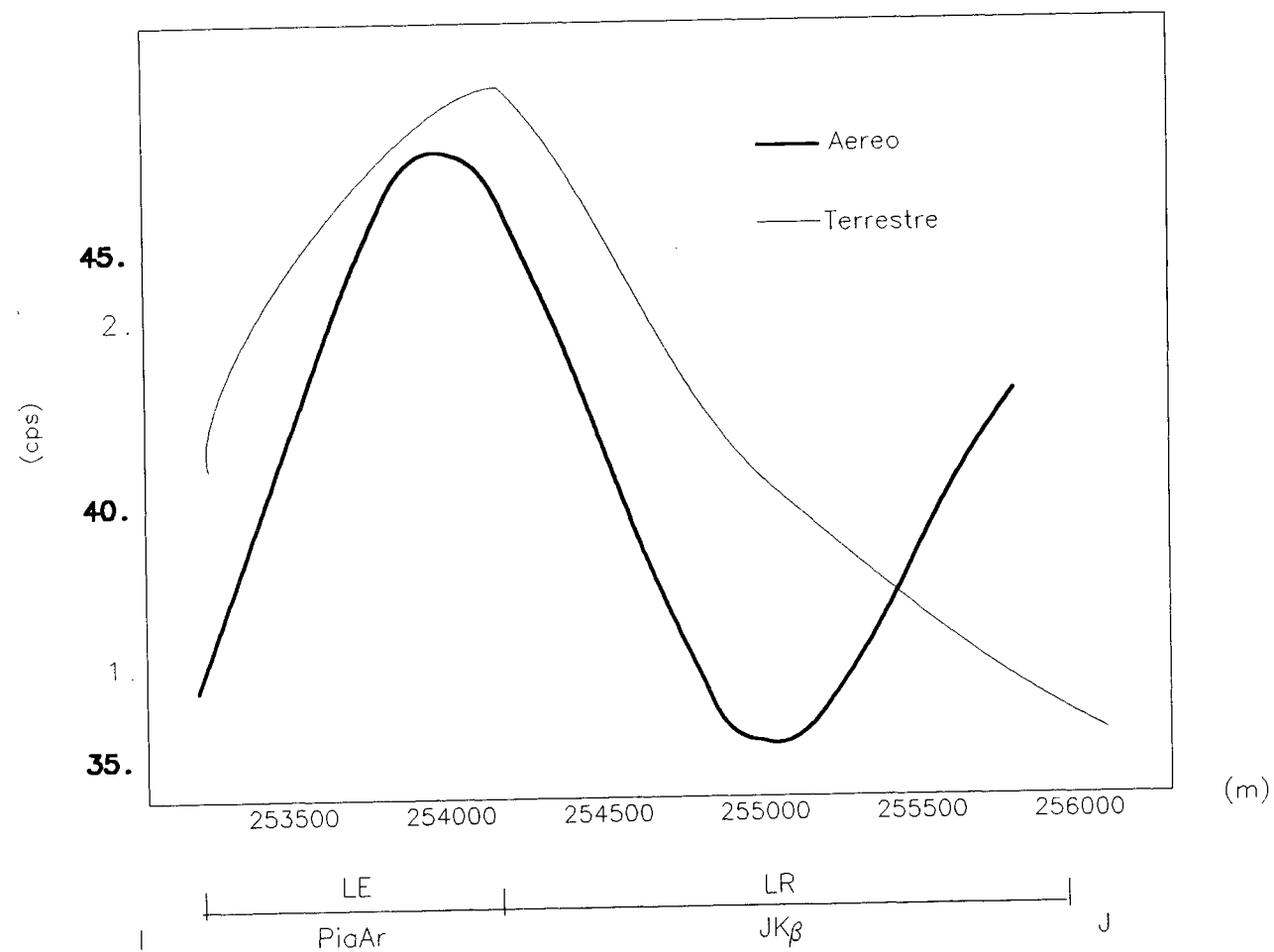


FIGURA 77 - PERFIL I-J (TÓRIO)

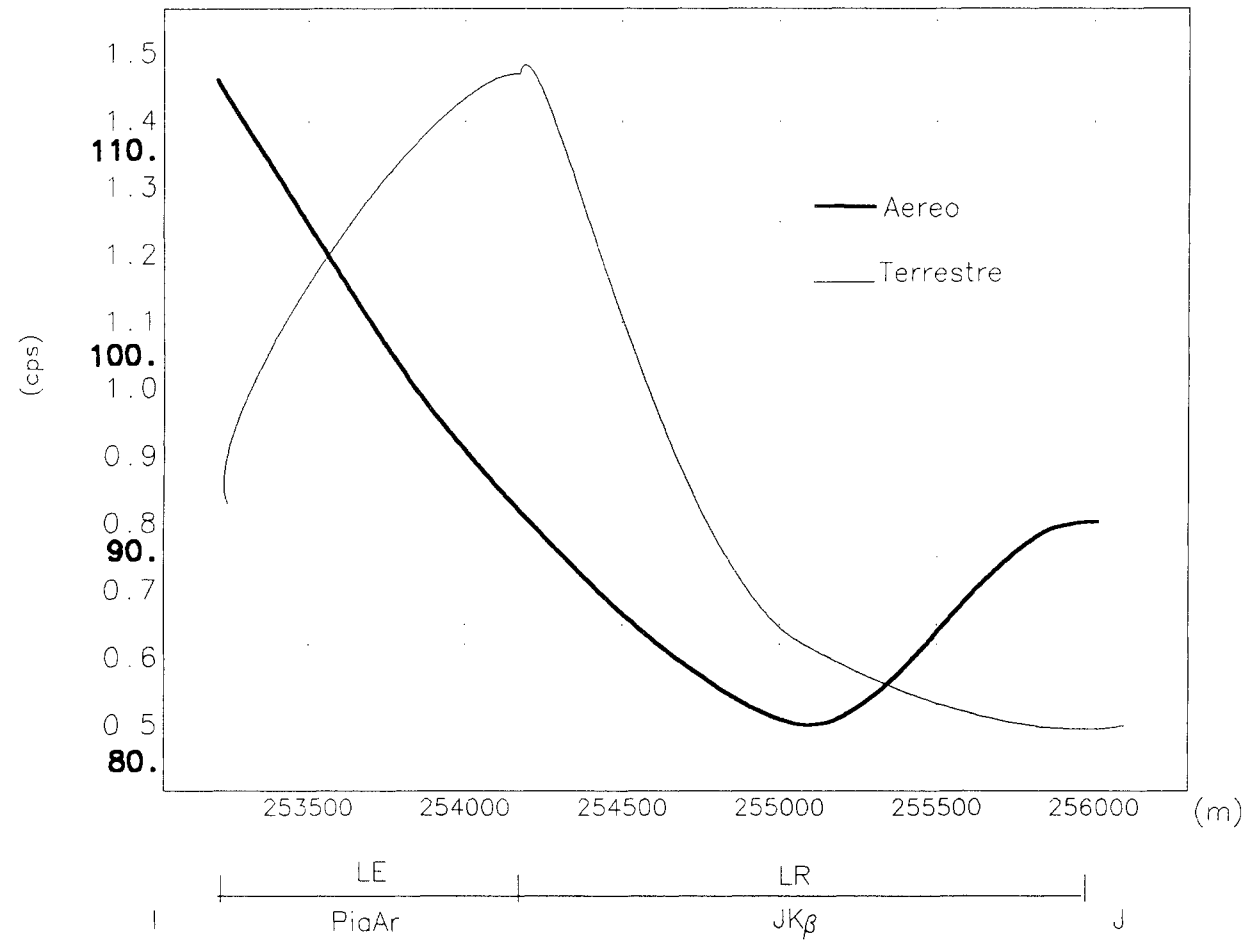
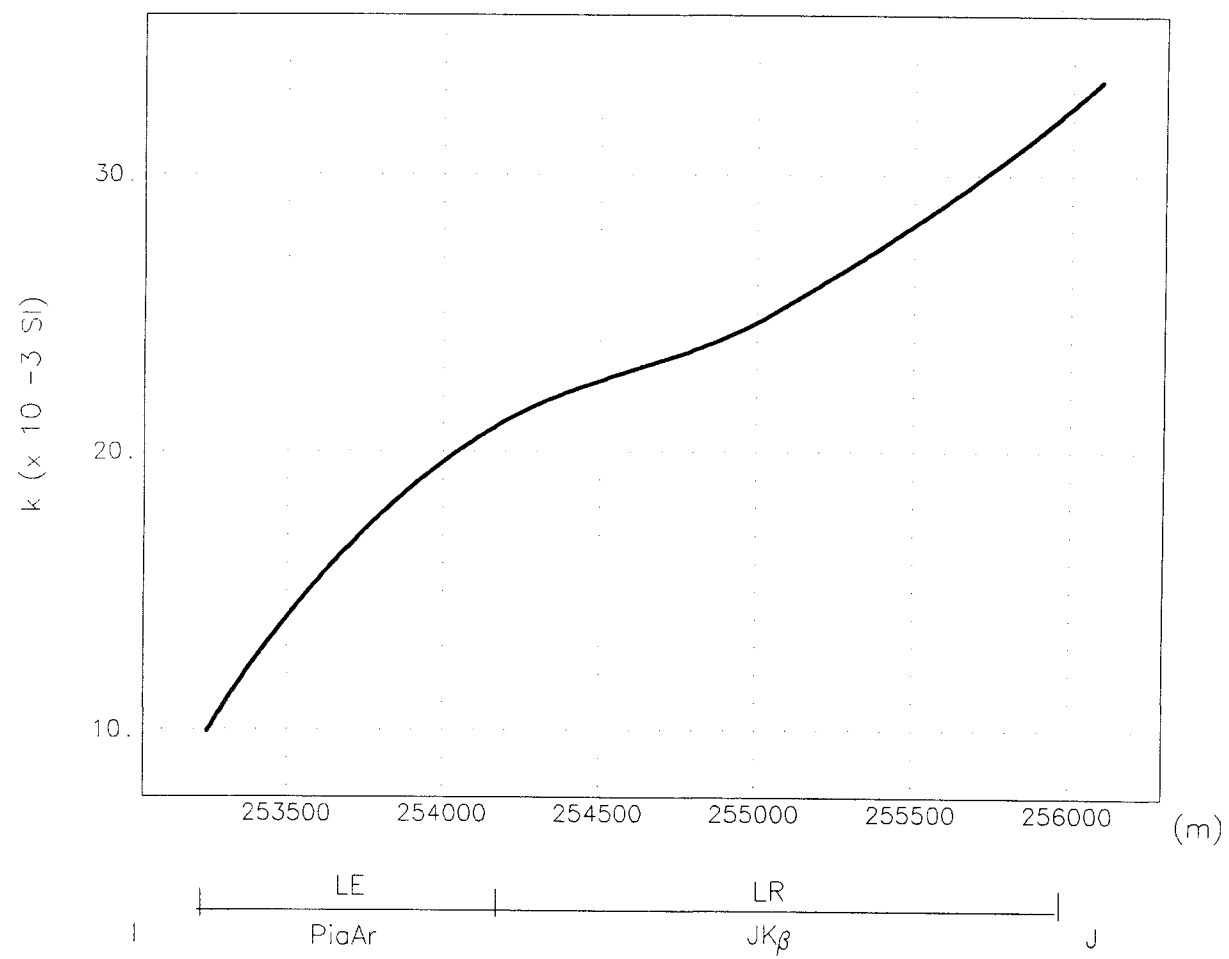


FIGURA 78 - PERFIL I-J (SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA)



9 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e de Processamento Digital de Imagens (PDI), possibilitaram relacionar com clareza os dados multifonte, facilitando a interpretação integrada;
- o emprego de métodos gamaespectrométricos (aéreo e terrestre) e de susceptibilidade magnética mostraram-se eficazes enquanto ferramenta de mapeamento de solos;
- a classificação não supervisionada da composição colorida RGB (KUTh), mostrou valores elevados e coincidentes de Th e K nos terraços (ou planícies) aluvionares do Rio Moji-Guaçu, os quais são bem destacados no modelo de elevação digital do terreno (MDT). A integração do MDT com o *cluster* K-Th, confirmou estas ocorrências.
- estas anomalias foram atribuídas a uma combinação dos seguintes fatores: (1) contribuição do potássio dos feldspatos e micas presentes nos solos de caráter câmbico das planícies aluvionares, provindos da alteração de rochas Pré-Cambrianas situadas ao norte da área estudada; (2) fertilização potássica realizada nas porções mais elevadas do terreno, considerando a mobilidade e a solubilidade do K em condições de intemperismo; (3) favorecimento da adsorção do Th em função da capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos, conferida pelo elevado teor de matéria orgânica; (4) transporte e deposição do Th adsorvido em colóides argilosos e óxidos de ferro oriundos das porções mais elevadas do terreno, onde ocorrem Latossolos Roxos sob intensa fertilização fosfatada associada a retenção do Th em função de processos pedogenéticos;
- a composição colorida RGB (KUTh), mostrou a coincidência espacial de elevados teores de K, U e Th com as porções elevadas do terreno, sobre as quais cultivava-se intensivamente a cultura de cana-de-açúcar sob os solos argilosos; o *cluster* desta composição, tabulado com as informações geológicas e pedológicas, confirmaram a referida correlação espacial;
- a classe dos Latossolos Roxos, disposta nestas condições de relevo e agricultura, encerra as anomalias ($>X + 3s$) de U e Th;

- considerando (1) que U e Th são facilmente adsorvidos nos minerais de argila e co-precipitados com óxidos de ferro nos solos durante o intemperismo das soleiras de diabásio; (2) que tais radionuclídeos estão associados com a fração silte/argila e sesquióxidos nos solos e tendem a se concentrar em relação aos teores primários da rocha mãe, interpreta-se tais anomalias como respostas destes processos, somadas à aplicação de fertilizantes fosfatados, uma vez que os dados médios de U em solos decorrentes da alteração de rochas vulcânicas máficas (~2 ppm), citadas pela literatura, são inferiores à média dos teores dos Latossolos Roxos analisados na presente pesquisa (~7 ppm), portanto uma relação de 3,5 vezes;
- as formações superficiais vinculadas às classes de regolitos de granulometria argila (soleiras de diabásio da Formação Serra Geral e Formação Corumbataí), mostraram valores elevados de urânio e tório, confirmando suas relações com a fração argilosa;
- os resultados radioquímicos de U nas amostras de solos analisadas na presente Dissertação, foram superiores aos obtidos em pesquisa sobre acumulação de urânio em solos fertilizados com fosfatos por mais de 80 (oitenta) anos;
- se os solos investigados apresentassem teores de matéria orgânica semelhantes aos encontrados pela literatura internacional, esperar-se-ia um grande incremento de U, considerando que este radionuclídeo tende a se acumular nas frações orgânicas dos solos;
- os resultados das análises radioquímicas de U em superfosfatos simples (SSP) foram condizentes com dados médios da literatura internacional; entretanto, os índices de Th na amostra de SSP analisada na presente pesquisa foram bem elevados, atribuindo-se esta diferença à provável origem ígnea da matéria-prima nacional;
- a influência da origem geológica da fonte de matéria-prima utilizada nas formulações NPK, também foi observada na amostra investigada (4-20-20). Os elevados teores de Th constatados apontam para a origem ígnea fosfática;
- além da influência geológica da fonte fosfática, constatou-se um incremento nas concentrações de urânio com o aumento de P_2O_5 do fertilizante. A formulação analisada (4-14-

08) mostrou concentração de U inferior a combinação (4-20-20), confirmando a relação direta entre os teores de U e P_2O_5 .

- apesar da importância de se conhecer a origem do processo químico da fonte fosfatada utilizada em combinações NPK, as concentrações de radionuclídeos não irão necessariamente responder conforme o tratamento químico ou o processo de produção dos fertilizantes fosfatados das matérias-primas utilizadas no fechamento da fórmula. Assim, por exemplo, uma formulação NPK pode ser constituída somente de MAP como fonte fornecedora de P_2O_5 e mostrar teores semelhantes de radionuclídeos a uma única amostra de SSP, em função da similaridade nas concentrações de P_2O_5 ;

- os dados gamaespectrométricos terrestres e de susceptibilidade magnética empregados na presente Dissertação, contribuíram para a discriminação de alguns solos do ponto de vista geofísico ambiental, uma vez que dispunha-se de dados pedológicos, geológicos, de formações superficiais e de relevo. Desta forma, as principais conclusões obtidas foram: (1) os Latossolos Roxos (LR) foram caracterizados por elevados índices de U, Th e k em regiões planas e topograficamente elevadas, refletindo a retenção destes radionuclídeos, em argilas e óxidos de ferro em perfis pedológicos bem desenvolvidos e derivados de soleiras de diabásio, o que torna estes ambientes originários de material básico, vulneráveis à contaminação radioativa pelos fertilizantes fosfatados; (2) a susceptibilidade magnética k foi um parâmetro importante na discriminação entre LR e LE, superando algumas dificuldades encontradas no campo durante a diferenciação destes solos. Em função da predominância de granulometria argila nos LE, somada à contribuição de produtos de alteração de material de origem básica e em porções topograficamente mais baixas, elevadas contagens de K, U e Th foram encontrados nesta classe de solo que, por sua vez, estavam sob o cultivo intensivo de cana-de-açúcar; (3) os maiores valores de K encontrados nos solos aluviais, podem ser atribuídos a presença de feldspatos potássicos e micas nos minerais formadores destes solos, bem como pela lixiviação do potássio de tratos mais elevados, sobretudo aqueles do embasamento cristalino, somadas a utilização de fertilizantes potássicos no cultivo de cana-de-açúcar; (4) a maioria dos LR e LE mostraram médias de U e Th maiores do que as encontradas na pedreira de diabásio, denotando a retenção de urânio e tório em solos mais desenvolvidos e com predominância de argilas e óxidos de ferro, bem como a influência da topografia do terreno, como referida anteriormente. O K da frente de lavra foi bem elevado quando comparado com a média

verificada nos LR e menor do que nos LE. Provavelmente em função do intemperismo, como citado por Wilford *et al.* (1997), nota-se uma depleção do K nos solos mais desenvolvidos. O incremento deste radionuclídeo para as porções mais baixas do terreno pode explicar os elevados índices do potássio nos LE; (5) os dados geofísicos também favoreceram a identificação de duas unidades de Podzólicos associadas (PV-3 + PV-4). Em uma delas, representadas por solos ferralíticos fortes e índices mais elevados de K, os valores de Th e U são maiores em função de um horizonte A mais argiloso (ausência de carácter abrupto);

- apesar de não terem sido realizados cálculos estatísticos para se averiguar a correlação existente entre os dados geofísicos, uma boa relação foi observada entre as tomadas gamaespectrométricas terrestres e aéreas, confirmando assim as discussões anteriormente mencionadas;

- as principais conclusões da pesquisa são consideradas preliminares, em função do pequeno número de medidas gamaespectrométricas terrestres (*follow-up* das anomalias aéreas) detalhados e de susceptibilidade magnética, associada a ausência de espectrometria gama de alta resolução, além do número reduzido de análises radioquímicas em amostras de solos e fertilizantes;

- assim sendo, sugere-se como continuidade da pesquisa levantamentos e amostragens detalhados de solos, rochas e água na Quadricula de Araras (SP), com o objetivo de discriminar com exatidão as contribuições naturais e antrópicas às anomalias de K, U e Th, bem como de avaliar suas implicações ambientais.

ANEXO I - DIGESTÃO TOTAL

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS
LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS

LAUDO DE ANÁLISE QUÍMICA

SOLICITANTE: Jocelyn (profº Hélio)

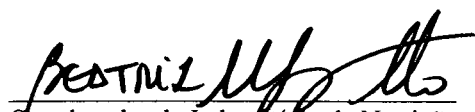
TIPO AMOSTRA: solos

ENDEREÇO: Departamento de solos

Nº DE AMOSTRAS:24

IDENTIFICAÇÃO	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Al (g/kg)	Fe (mg/kg)
Est. Lim. 1; 0-20	2,044	1,296	0,611	2,250	92,276	104,75
Cont. S. João 2; 0-20	0,829	1,195	0,712	1,750	42,500	78,25
Vs. S. João 4; 0-20	0,926	1,346	0,977	1,930	80,760	82,25
Basal 4. 6; 0-17	3,783	7,360	8,020	4,250	46,250	128,13
Ibicatu 9; 0-20	1,107	5,139	1,497	2,250	77,370	30,00
Talhão 4004/4. 0-40	1,489	0,619	1,273	1,750	74,925	155,50
Talhão 4004/4. 40-60	1,717	0,267	0,952	1,490	82,856	162,00
Talhão 4004/4. 60-80	1,111	0,228	0,559	1,860	94,483	163,50
Morro Alto 0-40	0,471	3,371	1,561	1,740	14,874	19,75
Foz Colorado 0-40	0,340	1,170	0,437	1,380	27,500	25,25
Talhão 4004/16. 0-40	1,595	0,819	1,536	1,130	84,910	128,25
Talhão 4004/16. 40-60	1,318	0,735	1,012	1,300	87,500	132,37
Talhão 4004/16. 60-80	1,041	0,720	0,625	1,000	90,000	129,25
PC5 Vs.Cresc. 0-20	3,060	0,520	1,937	1,250	75,000	111,75
PC5 Vs.Cresc. 20-60	3,432	0,425	1,608	1,240	91,568	120,50
PC5 Vs.Cresc.60-80	3,868	0,370	1,362	1,250	90,000	118,00
PC5 Vs.Cresc.80-120	3,287	0,393	1,279	0,740	93,476	121,38
PC5 Vs.Cresc.1,2-1,6	2,871	0,376	1,054	1,000	89,263	119,25
0-20 cm	0,897	0,552	0,211	1,000	57,255	79,75
20-40 cm	0,450	0,466	0,136	1,120	71,889	87,50
40-60 cm	0,640	0,438	0,186	1,130	74,773	87,00
60-80 cm	0,341	0,409	0,137	1,130	69,865	89,00
0,8-1,2 m	0,298	0,449	0,131	1,000	69,895	90,00
1,20-1,40 m	0,341	0,458	0,143	1,250	67,331	90,25

Curitiba, 05 de junho de 1997.


Coordenador do Laboratório de Nutrição
Mineral de Plantas


Chefe do Departamento de Solos

ANEXO II - ROTINA DOS SOLOS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

DEPARTAMENTO DE SOLOS

Rua dos Funcionários, s/n - FONE 252-3422 - Cx. P. 672

80001 - Curitiba - Paraná

LAUDO DE ANÁLISE QUÍMICA

CERTIFICADO Nº 1133/96

Total de amostras : 26

Data ENTRADA : 21/11/96

Data SAÍDA : 28/11/96

SOLICITANTE : CARACT. DE ANOMALIAS AEROGAM. DE K,V,Th

COMUNIDADE : DEPTO. SOLOS

ENDEREÇO (p/ Correspondência) : E NAS EVENTUAIS RELAÇÕES C/FERT.FOSFAT

DENOM/IMÓVEL : PROF. HELIO O. DA ROCHA

MUNICÍPIO : ARARAS

ESTADO : SP

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	pH	cmolc/dm3						mg/dm3			x m	x V
		CaCl	Al ⁺³	H+Al	Ca ⁺² +Mg ⁺²	Ca ⁺²	K ⁺	T	P	C		
PTO. 1 0 - 20	4.80	0.4	6.2	4.6	3.0	0.16	11.0	4.0	15.8	7.8	43.4	
PTO. 2 0 - 20	5.50	0.0	4.9	5.8	4.3	0.17	10.9	3.0	23.8	0.0	54.9	
PTO. 4 0 - 20	5.80	0.0	3.6	6.4	4.5	1.90	11.9	4.0	15.1	0.0	69.7	
PTO. 6 0 - 20	6.50	0.0	2.5	19.8	18.5	1.50	23.8	14.8	35.6	0.0	89.5	
PTO. 9 0 - 20	6.50	0.0	2.5	6.8	5.8	0.93	10.2	4.0	15.1	0.0	75.6	
TL.4004-4 0-40	6.40	0.0	2.7	6.4	4.7	0.56	9.7	17.0	18.4	0.0	72.0	
TL.4004-4 40-60	6.30	0.0	2.9	5.2	3.3	0.06	8.2	5.0	10.5	0.0	64.5	
TL.4004-4 60-80	6.40	0.0	2.7	4.1	2.6	0.06	6.9	2.0	6.8	0.0	60.6	
TL.7001 0 - 40	6.10	0.0	3.6	3.4	3.9	2.01	9.0	14.0	19.1	0.0	60.0	
M.ALTO 0 - 40	6.20	0.0	3.4	8.1	6.8	0.17	11.7	7.0	14.5	0.0	70.9	
F.COLOR. 0 - 40	4.60	0.6	7.2	6.4	1.3	0.14	13.7	3.0	10.5	8.4	47.6	
TL.4004-16 0-40	5.50	0.0	4.9	6.4	5.1	1.32	12.6	18.0	22.3	0.0	61.2	
TL.4004-1640-60	5.70	0.0	4.6	4.2	3.5	1.15	10.0	3.0	13.8	0.0	53.8	
TL.4004-1660-80	5.80	0.0	4.2	3.8	2.7	1.10	9.1	2.0	12.5	0.0	53.8	
PC 5 0 - 20	6.10	0.0	3.6	7.4	6.2	0.43	11.4	8.0	20.4	0.0	68.5	
PC 5 20 - 60	6.20	0.0	3.1	5.4	4.9	0.23	8.7	4.0	11.2	0.0	64.5	
PC 5 60 - 80	6.40	0.0	2.9	4.4	3.8	0.18	7.5	4.0	8.8	0.0	61.2	
PC 5 80 - 120	6.50	0.0	2.7	3.6	3.2	0.10	6.4	3.0	6.8	0.0	57.8	
PC 5 120 - 160	6.60	0.0	2.5	3.5	2.6	0.09	6.1	2.0	6.2	0.0	58.9	
F.NAT. 0 - 20	4.40	2.8	9.0	2.4	0.6	0.25	11.7	2.0	25.0	51.4	22.7	
F.NAT. 20 - 40	4.60	1.8	8.3	1.5	0.6	0.09	9.9	1.0	14.5	53.1	16.1	
F.NAT. 40 - 60	4.60	1.2	7.2	1.1	0.4	0.09	8.4	1.0	12.5	50.2	14.2	
F.NAT. 60 - 80	4.70	0.7	6.2	0.8	0.5	0.08	7.1	1.0	11.2	44.3	12.4	
F.NAT. 80 - 120	4.80	0.4	5.3	1.2	0.3	0.06	6.6	1.0	10.5	24.1	19.2	
F.NAT. 120 - 140	4.80	0.5	5.3	1.1	0.4	0.05	6.5	1.0	9.9	30.3	17.8	
DIABASICO												

Neste laudo NÃO constam recomendações de adubos e corretivos, e seu valor é restrito apenas a amostra analisada.

Responsável Técnico
Prof. Antônio Carlos V. Motta
 Eng.º Agr.º CREA n.º 18725-D
 Coord. do Lab. Fertilidade de Solos
 do Departamento de Solos

Chefe do Departamento
Prof.ª Beatriz M. Serraf Prevedello
 Chefe do Dept. de Solos

ANEXO III - FÍSICA DOS SOLOS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

DEPARTAMENTO DE SOLOS

Rua dos Funcionários, s/n - FONE 252-3422 - Cx. P. 672

80001 - Curitiba - Paraná

LAUDO VETTORI Completo

CERTIFICADO Nº 1133/96

Total de amostras : 26

Data ENTRADA : 21/11/96

Data SAÍDA : 09/12/96

SOLICITANTE : CARACT. DE ANOMALIAS AEROGAM. DE K,V,Th

COMUNIDADE : DEPTO. SOLOS

ENDEREÇO (p/ Correspondência) : E NAS EVENTUAIS RELAÇÕES C/FERT.FOSFAT.

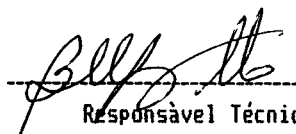
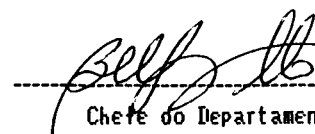
DENOM/IMÓVEL : PROF. HELIO O. DA ROCHA

MUNICÍPIO : ARARAS

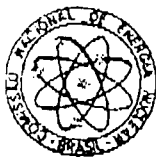
ESTADO : SP

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	% A.Final	% A.Gros	% AREIA	% SILTE	% ARGILA
PTO. 1 0 - 20	10.0	4.0	14.0	20.0	66.0
PTO. 2 0 - 20	14.0	6.0	20.0	38.0	42.0
PTO. 4 0 - 20	14.0	6.0	20.0	20.0	60.0
PTO. 6 0 - 20	14.0	12.0	26.0	40.0	34.0
PTO. 9 0 - 20	16.0	10.0	26.0	24.0	50.0
TL.4004-4 0-40	12.0	8.0	20.0	22.0	58.0
TL.4004-4 40-60	10.0	6.0	16.0	16.0	68.0
TL.4004-4 60-80	10.0	4.0	14.0	18.0	68.0
TL.7001 0 - 40	10.0	4.0	14.0	24.0	62.0
M.ALTO 0 - 40	18.0	12.0	30.0	46.0	24.0
F.COLOR. 0 - 40	34.0	28.0	62.0	18.0	20.0
TL.4004-16 0-40	8.0	8.0	16.0	34.0	50.0
TL.4004-1640-60	10.0	8.0	18.0	36.0	46.0
TL.4004-1660-80	10.0	8.0	18.0	18.0	64.0
PC 5 0 - 20	12.0	6.0	18.0	24.0	58.0
PC 5 20 - 60	12.0	8.0	20.0	16.0	64.0
PC 5 60 - 80	12.0	8.0	20.0	16.0	64.0
PC 5 80 - 120	12.0	6.0	18.0	20.0	62.0
PC 5 120 - 160	10.0	6.0	16.0	20.0	64.0
F.NAT. 0 - 20	10.0	8.0	18.0	22.0	60.0
F.NAT. 20 - 40	8.0	4.0	12.0	28.0	60.0
F.NAT. 40 - 60	10.0	4.0	14.0	22.0	64.0
F.NAT. 60 - 80	10.0	6.0	16.0	20.0	64.0
F.NAT. 80 - 120	10.0	6.0	16.0	18.0	66.0
F.NAT. 120 - 140	10.0	6.0	16.0	20.0	64.0
DIABASICO					

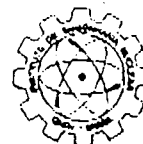
NOTA : A presente análise tem seu valor restrito as amostras entregues no S.C.A.


Responsável Técnico
Chefe do Departamento

ANEXO IV - RADIOQUÍMICA



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
SERVIÇO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA



RELATÓRIO DE ANÁLISE

Solicitante: Prof. Francisco José F. Ferreira

Coordenação do Curso de Pós-graduação em Geologia - UFPR

Análise: Urânio Natural, Urânio-238 e Tório Natural.

Data da Análise: Set-Out/97

Estamos enviando os resultados de medidas de urânio e tório em amostras de solo e fertilizantes, atendendo a solicitação feita em setembro de 1997.

Para a determinação de Urânio utilizou-se o método fluorimétrico e para o tório o método espectrofotométrico, ambos precedidos da separação radioquímica correspondente.

Amostra	U nat. ppm	U nat. Bq/Kg (seco)	U-238 Bq/Kg (seco)	Th nat. Bq/Kg (seco)	Th nat. ppm
800/96	7,58 + 0,23	182,6 + 5,5	94,05 + 2,8		
803/96	3,87 + 0,12	93,08 + 2,81	47,95 + 1,48		
804/96	11,56 + 0,49	278,4 + 11,73	143,4 + 6,05	14,08 + 2,16	3,46 + 0,53
808/96	3,97 + 0,15	95,70 + 0,35	49,30 + 0,18	21,36 + 2,12	5,25 + 0,52
811/96	8,00 + 0,29	192,7 + 7,11	99,26 + 3,66		
816/96	6,26 + 0,28	150,7 + 6,83	77,64 + 3,54		
FSS	21,83 + 0,58	533,92 + 14,13	270,70 + 7,28	402,52 + 12,70	98,90 + 3,12
4.20.20	18,53 + 0,63	446,00 + 15,17	229,80 + 7,81	191,70 + 8,79	47,10 + 2,16
4.14.08	7,93 + 0,29	190,90 + 7,13	98,36 + 3,67	622,71 + 49,25	153,0 + 12,1

Rio de Janeiro, 31 de outubro de 1997.

Vicente de Paula Melo
Tecnologista - Mat. 1925-7

Vandir de Azevedo Gouveia
Pesquisador - Mat. 5137-5

Donald Anthony Clarke Binns
Chefe do SPR/IEN

ANEXO V - VINHAÇA

ANÁLISE QUÍMICA DE VINHAÇA DILUÍDA - SAFRA 89/90

LABORATÓRIO COPERSUCAR

Kg/m³ DE VINHAÇA

DATA			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	M.O.	p.H
15	a	21/05/89	0,34	0,01	0,48	0,29	0,01	2,12	4,45
22	a	28/05/89	0,18	0,03	0,84	0,46	0,03	3,55	4,48
29/05	a	04/06/89	0,22	0,05	0,84	0,49	0,13	6,06	4,03
05	a	11/06/89	0,21	0,03	0,60	0,53	0,07	5,07	4,16
12	a	18/06/89	0,21	0,04	0,72	0,46	0,08	4,53	4,06
19	a	25/06/89	0,24	0,05	0,60	0,49	0,07	5,63	4,07
26/06	a	02/07/89	0,16	0,03	0,84	0,59	0,08	6,47	3,76
03	a	09/07/89	0,06	0,01	0,48	0,54	0,13	3,88	4,19
10	a	16/07/89	0,11	0,03	0,60	0,61	0,05	4,27	4,29
17	a	23/07/89	0,20	0,03	0,72	0,50	0,17	5,34	4,11
24	a	30/07/89	0,24	0,06	0,72	0,57	0,11	8,15	4,70
31/07	a	06/08/89	0,12	0,07	0,48	0,49	0,10	6,03	4,65
07	a	13/08/89	0,22	0,02	0,60	0,47	0,12	3,40	5,03
14	a	20/08/89	0,11	0,02	0,48	0,43	0,11	5,41	4,49
21	a	27/08/89	0,16	0,02	0,72	0,45	0,15	8,84	4,13
28/08	a	03/09/89	0,09	0,02	0,72	0,48	0,12	5,11	3,96
04	a	10/09/89	0,09	0,02	0,60	0,41	0,11	5,52	4,44
11	a	17/09/89	0,25	0,07	0,72	0,63	0,19	7,69	4,21
18	a	24/09/89	0,20	0,03	0,36	0,56	0,11	3,10	4,43
25/09	a	01/10/89	0,32	0,04	0,60	0,59	0,15	5,83	4,28
02	a	08/10/89	0,28	0,05	0,84	0,42	0,18	6,03	4,53
09	a	15/10/89	0,20	0,04	0,60	0,42	0,18	5,11	4,43
		16/10/89	0,26	0,03	0,60	0,38	0,12	5,95	4,63
MEDIA			0,19	0,04	0,64	0,49	0,11	5,35	4,33

ANÁLISE QUÍMICA DE VINHAÇA DILUÍDA - SAFRA 90/91

LABORATÓRIO COPERSUCAR

Kg/m³ DE VINHAÇA

DATA	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	M.O.	pH
17. a 20/05/90	0,03	0,15	0,74	0,27	0,13	2,40	4,21
21 a 27/05/90	0,03	0,21	0,95	0,46	0,18	3,16	4,18
28/05 a 03/06/90	0,06	0,03	0,90	0,44	0,17	3,79	4,09
04 a 05/06/90	0,05	0,03	0,79	0,50	0,14	3,87	4,54
11 a 17/06/90	0,04	0,02	0,79	0,39	0,15	2,81	4,52
18 a 24/06/90	1,01	0,03	0,75	0,36	0,10	5,23	4,48
25/06 a 01/07/90	1,48	0,05	1,20	0,52	0,20	7,62	4,27
02 a 08/07/90	0,97	0,03	0,70	0,46	0,12	4,79	4,51
09 a 15/07/90	0,15	0,03	0,85	0,49	0,15	7,05	4,38
16 a 22/07/90	0,06	0,03	0,85	0,49	0,15	7,28	4,53
23 a 29/07/90	0,06	0,03	0,75	0,46	0,14	5,49	4,71
31/07 a 05/08/90	0,09	0,05	0,69	0,42	0,13	3,38	4,62
06 a 10/08/90	0,07	0,03	0,83	0,38	0,15	4,16	4,28
13 a 19/08/90	0,10	0,03	0,49	0,21	0,08	2,31	4,36
20 a 26/08/90	0,12	0,04	0,88	0,42	0,19	5,86	4,22
27/08 a 02/09/90	0,12	0,04	0,64	0,39	0,13	8,02	4,30
03 a 09/09/90	0,05	0,03	0,41	0,35	0,11	4,24	4,52
10 a 16/09/90	0,07	0,05	0,70	0,29	0,09	4,51	4,21
17 a 22/09/90	0,08	0,03	0,70	0,27	0,09	3,75	4,23
24 a 30/09/90	0,07	0,03	0,80	0,29	0,10	4,74	4,46
01 a 07/10/90	0,06	0,03	0,70	0,30	0,07	2,78	5,09
07 a 14/10/90	0,05	0,03	0,43	0,25	0,10	-	4,46
15 a 21/10/90	0,06	0,04	0,45	0,21	0,11	-	4,22
22 a 28/10/90	0,10	0,04	0,47	0,27	0,12	-	4,19
29 a 31/10/90	0,20	0,07	0,57	0,24	0,13	-	3,85
MÉDIA	0,21	0,05	0,72	0,37	0,13	4,63	4,38

Araras, DTA - 12/12/90-.

ANÁLISE QUÍMICA DE VINHAÇA DILUÍDA - SAFRA 91/92
LABORATÓRIO COPERSUCAR

Kg/m³ DE VINHAÇA

DATA	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	M.O.	pH
20/05 a 26/05/91	0,09	0,03	0,78	0,28	0,11	4,61	4,31
27/05 a 02/06/91	0,08	0,04	0,64	0,38	0,09	3,19	4,44
03/06 a 09/06/91	0,11	0,04	0,62	0,40	0,09	4,65	4,12
10/06 a 17/06/91	0,15	0,05	1,15	0,52	0,17	6,31	4,08
17/06 a 23/06/91	0,15	0,02	0,88	0,52	0,15	4,70	4,18
24/06 a 30/06/91	0,12	0,02	0,74	0,46	0,11	3,68	4,27
02/07 a 08/07/91	0,09	0,05	0,50	0,34	0,10	5,09	4,19
08/07 a 14/07/91	0,05	0,04	0,68	0,35	0,11	4,21	4,18
15/07 a 21/07/91	0,06	0,04	0,48	0,32	0,10	4,87	4,06
22/07 a 28/07/91	0,08	0,04	0,70	0,36	0,12	5,33	4,24
29/07 a 04/08/91	0,05	0,04	0,70	0,34	0,11	3,97	4,28
05/08 a 11/08/91	0,08	0,04	0,62	0,31	0,11	4,72	4,08
12/08 a 18/08/91	0,09	0,03	0,48	0,26	0,09	4,56	4,08
19/08 a 25/08/91	0,07	0,03	0,62	0,32	0,11	4,13	4,13
26/08 a 01/09/91	0,07	0,03	0,48	0,31	0,11	4,26	4,06
02/09 a 08/09/91	0,09	0,02	0,56	0,34	0,12	5,77	4,24
09/09 a 15/09/91	0,09	0,03	0,54	0,36	0,10	4,39	4,26
16/09 a 22/09/91	0,13	0,04	0,64	0,38	0,12	6,72	4,22
23/09 a 30/09/91	0,07	0,03	0,46	0,32	0,10	5,29	4,36
30/09 a 06/10/91	0,11	0,04	0,66	0,34	0,14	5,51	4,01
07/10 a 11/10/91	0,10	0,01	0,46	0,34	0,11	6,40	4,28
MÉDIA	0,09	0,03	0,64	0,36	0,11	4,87	4,19

GRUPO USINA SÃO JOÃO
D.T.A.

RESULTADOS DA ANÁLISES DE VINHÇA DILUÍDA - SAFRA 93/94
(análises realizadas na Copersucar)

SEMANA	Kg DE K_2O/m^3
19/05 a 23/05/93	0,54
24/05 a 30/05/93	1,10
01/06 a 05/06/93	0,88
07/06 a 13/06/93	0,70
14/06 a 20/06/93	0,96
21/06 a 27/06/93	0,60
28/06 a 04/07/93	0,40
05/07 a 11/07/93	0,70
12/07 a 18/07/93	0,72
19/07 a 25/07/93	0,80
26/07 a 01/08/93	0,62
02/08 a 08/08/93	0,74
09/08 a 15/08/93	0,40
16/08 a 22/08/93	0,50
23/08 a 29/08/93	1,02
30/08 a 06/09/93	0,50
07/09 a 12/09/93	0,76
13/09 a 19/09/93	0,60
20/09 a 26/09/93	0,44
27/09 a 03/10/93	0,36

13/24/2000 0,67
Araras, 02 de fevereiro de 1974.-

Natura.chi

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, D. S. Sistemas de informação geográfica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO (1990 : São Paulo). **Anais...** São Paulo : USP, Escola Politécnica, 1990. p. 66-78.
- ANJOS, I. L. S.; MOURÃO, L. M. F. Projeto São Paulo Rio de Janeiro, Relatório Final, Processamento de Dados, Parte I - São Paulo. Texto, v.2, Companhia de Recursos Minerais - CPRM, 29p.1988.
- ARYA, A. P. **Fundamentals of Nuclear Physics**. Boston : Allyn and Bacon Inc, 1966.
- BICHO, C. P. **Processamento digital de imagens aerogeofísicas, Lansat/TM e radar na folha Presidente Médici/RO com ênfase na caracterização metalogenética da suíte granítica Rio Pardo**. Campinas, 1994. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- BOYLE, R. W. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. **Developments in economic geology**, n.16, p. 71-78, 1982.
- BRIGGS, I.C. **Machine contouring using minimum-curvature**. *Geophysics*, n.39, p. 39-48, 1974
- BRISTOW, Q. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration - Airborne instrumentation. **Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores**. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.135-146. 1979.
- BROLLO, M. J. **Mapeamento geotécnico da quadrícula de Araras - SP escala 1: 50.000**. São Carlos, 1991. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CLARK, D. A. Magnetic petrophysics and magnetics petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. . **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n.2, p.83-103, 1997.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens**. ed. rev. Campinas, SP : IG/UNICAMP, 1993.

CULLEN, T. L.; PASCHOA, A. S. Radioactivity in certain products in Brazil. **Radioactivity in Consumer Products**, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, p. 376-379, August. 1978.

DANTAS, C. C.; SANTOS, F. S. M.; PAULA, H. C. B.; SANTANA, A. O. Recuperação de urânio em escala piloto como subproduto do fertilizante fosfatado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, (1984 : Rio de Janeiro). **Anais...** Rio de Janeiro, 1984. p. 2060.

DARNLEY, A. G.; FLEET, M. Evaluation of airborne gamma-ray spectrometry in the Bancroft and Elliot Lake areas of Ontario, Canada. Proc. *In*: 5th SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. University of Michigan, Ann Arbor, p. 833-853. 1968.

DELEON, A.; LAZAREVÍC. Possibilities for recovery of uranium as a by-product in the production of phosphate fertilizers and tripolyphosphate. *In*: IAEA- SM-135/39, p. 351. [19--].

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, Austrália, v.17, n. 2, p. 187-200. 1997.

EASTMAN, J. R. **Idrisi for windows - User's guide version 2.0**. Worcester, USA : IDRISI production, Clark University, 1997.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos. Rio de Janeiro : EMBRAPA, 1979.

ENGESPAÇO. Manual do usuário SGI - Sistema Geográfico de Informações : Manual do usuário. Versão 2.0. ed. São José dos Campos, 1989.

ENGESPAÇO. Manual do usuário SITIM - Sistema de Tratamento de Imagens : Manual do usuário. Versão 2.2. ed. São José dos Campos, 1989.

FERREIRA, F. J. F. **Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do Pré-Cambriano paulista**. São Paulo, 1991. Tese de doutoramento - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. (Inédita).

FREITAS, R. O.; MEZZALIRA, S.; ODA, G. H.; VIEIRA, P. C.; TÔRRES, C. C.; HACHIRO, J.; TOMONAGA, L. K.; DEHIRA, L. K.; MASSOLI, M.; AZEVEDO, A. A. B.; PRESSINOTI, M. M. N. Projeto de levantamento geológico de formações superficiais. *In: ATAS DO II SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA*, Rio Claro, 1979. Livro 2, p. 263-277.

GRASTY, R. L. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration - Theory and operational procedures. **Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores**. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.147- 161, 1979.

GRASTY, R. L.; KOSANKET, K. L.; FOOTES, R. S. Fields of view of airborne gamma-ray detectors. **Geophysics**, 1979, v.44, n. 8, p. 1447-1457.

GRASTY, R. L. Applications of gamma ray spectrometry to mineral exploration and geological mapping. *In: FOURTH DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION* (1997: Canada). Canada : Bob Grasty Exploranium Ltd, 1997.p. 3.

GROSS, W. H. Some aspects of low-level radiation. **Western Miner**, Canada, p.95-33, jan. 1980.

GUIMOND, R. J. The Radiological aspects of fertilizer utilization. **Radioactivity in Consumer Products**, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, p. 380-392, August. 1978.

GUIMOND, R. J.; HARDIN, J. M. Radioactivity released from phosphate-containing fertilizers and from gypsum. **J. Radiat. Appl. Instrum.**, 1989. Radiat. Phys. Chem., v. 34, n. 2, p. 309-315.

GUZMAN, E. T. R. **Recuperacion de uranio en roca fosforica y sus derivados**. Toluca, México, 1992. Tesis (Licenciatura de Químico) - Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México.

GUZMAN, E. T. R.; RÍOS, M. S.; GARCÍA, J. L. I.; REGIL, E. O. Uranium in phosphate rock and derivatives. **Journal of radioanalytical and nuclear chemistry**, 1995. Articles, v. 189, n. 2, p. 301-306.

INSTITUTO ASTRONÔMICO E GEOFÍSICO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO IAG-USP. **Introdução à Geofísica**. Apostila de curso proferido no IAG-USP, São Paulo, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. **Carta topográfica da folha de Araras (SP)**. Rio de Janeiro : Fundação IBGE, 1969. 1 mapa. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. **Carta topográfica da folha de Leme (SP)**. Rio de Janeiro : Fundação IBGE, 1971. 1 mapa. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. **Carta topográfica da folha de Rio Capetinga (SP)**. Rio de Janeiro : Fundação IBGE, 1971. 1 mapa. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. **Carta topográfica da folha de Conchal (SP)**. Rio de Janeiro : Fundação IBGE, 1974. 1 mapa. Escala 1:50.000.

INSTITUTO GEOLÓGICO IG. **Formações superficiais - Folha geológica de Leme**. São Paulo : Aerofoto Cruzeiro S.A, 1980. 1 mapa : color. Escala 1:50.000.

INSTITUTO GEOLÓGICO IG. **Formações geológicas de superfície - Folha geológica de Rio Capetinga**. São Paulo : Aerofoto Cruzeiro S.A, 1981. 1 mapa : color. Escala 1:50.000.

INSTITUTO GEOLÓGICO IG. **Formações superficiais - Folha geológica de Araras**. São Paulo : Aerofoto Cruzeiro S.A, 1987. 1 mapa : color. Escala 1:50.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO IPT. **Mapa geológico da folha de Campinas**. São Paulo : DIGEO, 1993. 1 mapa : cópia heliográfica. Escala 1:250.000.

INTERNATIONAL ASSOCIATION ENERGY ATOMIC IAEA. **Gamma-ray surveys in uranium exploration, a manual IAEA**. Technology Report Series, n. 186, 90p.1979.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis**. Madison, Wis., 1956. 894p. Mimeo.

KAPLAN, I. Física Nuclear. *In: Radioatividade natural e as leis da transformação radioativa*. 1 edição. Rio de Janeiro : Guanabara, 1978. p.194.

KILEEN, P. G. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration - Application and interpretation. **Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores**. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.163-229, 1979.

- LAPIDO-LOUREIRO, F. E. Alkaline Rocks and Carbonatites. *In: Correlation of uranium geology between south America and Africa*. Technical Reports Series N°270, International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria : 1986. p. 345-415.
- LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. Geofísica de Prospecção. Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup, 1995. v. 3, p.215-227.
- MENZEL, R. G. Uranium, radium and thorium content in phosphate rocks and their possible radiation hazard. *J. Agr. Food Chem.*, 1968, v-16, p.231-284.
- MARQUES, L. S. Rare elements. *In: PICCIRILO, E. M.; MELFI, A. J. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo : Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. p.499-504.
- MINTY, B. R. S. Fundamentals os airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n.2, p.39-50, 1997.
- MINTY, B. R. S; LUYENDYK, A. P. J.; PRODIE, R. C. Calibration and data procesising for airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n.2, p.51-62, 1997.
- MISENER, D. J.; SINCLAIR, R.; MOURÃO, L. M. F. A new Brazil radiometric generation and application. *In: 5th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY (1997 : São Paulo. Anais... São Paulo : SBGf, 1997. p. 564.*
- MITISHITA, E. A. Modelo digital do terreno e suas aplicações na área florestal. *In: I SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO - SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (1994 : Curitiba). Anais... Curitiba : FUPEF, 1994. p. 49-72.*
- MORTVEDT, J. J. Effects of calcium silicate slag aplication on radium-226 concentrations in plant tissues. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* v.17, p.75-84. 1986.
- NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto - Princípios e aplicações. *In: As interações entre a energia e a matéria*. 1992. p. 9-20.

OLIVEIRA, J. B.; MENK, J. R. F. BARBIERI, J. L.; ROTTA, C. L.; TREMOCOLDI, W.
Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula Araras. Campinas : IAC, n. 71, 1982.

OLIVEIRA, J. B.; MENK, J. R. F. BARBIERI, J. L.; ROTTA, C. L.; TREMOCOLDI, W.
Mapa do levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo - Quadrícula Araras. Campinas : Aerofoto Cruzeiro S.A., 1981. 1 mapa : color. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento.** 2 ed. Jaboticabal : FUNEP, 1992.

PARASNIS, D. S. Principles of applied geophysics. *In: Radioactivity methods.* p.318-326.

PARREIRA, P. S.; APPOLONI, C. R.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; PAULA, F. R.
 Avaliação do aumento da radioatividade natural de um solo LRd resultante da aplicação de fosfogesso. **IV ENAN Abstracts**, Poços de Caldas, paper 057, p. 68, aug. 1997. Resumo.

PASCHOA, A. S.; MAFRA, O. Y.; OLIVEIRA, C. A. N.; PINTO, L. R. Atomic and nuclear methods in fossil energy research. *In: FILBY, R.H.; CARPENTER, B. S.; RAGAINI, R. C. (eds). Plenum Publishing Corporation.* 1982. p. 61-68.

PASCHOA, A. S.; MAFRA, O. Y.; CARDOSO, D. O.; ROCHA, A. C. S. Application of SSNTD to the brazilian phosphate fertilizer industry to determine uranium concentrations. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 8, n. 1-4, p. 469-472. 1984.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULLSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C.
Manual de análise química de solo e controle de qualidade. Londrina : IAPAR, 1979.

PERALTA, P. **A landscape ecological assesment of the development of extractive reserves of brazilian Amazonian by integrating remote sensing and GIS analysis.** Nottingham, 1996. Tese de doutoramento - University of Nottingham.

PFISTER, H.; PHILIPP, G.; PAULY, H. Population dose from natural radionuclides in phosphate fertilizers. **Radiation and Environmental Biophysics**, v. 13, p. 247-261, 1976.

PUGGINA, W. A. A indústria de fertilizantes no Brasil - Panorama atual e perspectivas. *In: I SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES - VI ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA* (1994 : São Paulo). **Anais...** São Paulo : ANDA, IBF, 1994. p. 35-66.

- QUINTANILHA, J. A. Processamento de imagens digitais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO* (1990 : São Paulo). **Anais...** São Paulo : USP, Escola Politécnica, 1990. p. 37-52.
- RING, R. J. Recovery of byproduct uranium from the manufacture of fosfatic fertilizers. **Atomic Energy**, p. 12-20. 1977.
- RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO [DO] IAC - BOLETIM TÉCNICO 100. São Paulo, 1996.
- RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em Latossolos do Sudeste e Sul do Brasil. *In: III REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA* (Rio de Janeiro : 1988). **Anais...** Rio de Janeiro : EMBRAPA/SNLCS, 1988. p. 233-258.
- RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO* (1990 : São Paulo). **Anais...** São Paulo : USP, Escola Politécnica, 1990. p. 1-27.
- ROTHBAUM, H. P.; McGAVESTON, D. A.; WALL, T.; JOHNSTON, A. E.; MATTINGLY, G. E. G. Uranium accumulation in soils from long-continued applications of superphosphate. **Journal of Soil Science**, march 1979. Oxford, v. 30, n. 1, 147-153.
- SAAD, S. Aspectos Econômicos do aproveitamento do urânio associado aos fosfatos do Nordeste, Boletim n 7. CNEN, 1974.
- SAUNDERS, D. F.; POTTS, M. J. Interpretation and application of high-sensitivity airborne gamma-ray spectrometer data. *In: Exploration for uranium ore deposits*. Proc Series. Vienna, Austria : IAEA, 1976. p. 107-125.
- SCARIM, J. L.; TEIXEIRA, A. L. A. Digitalização e conversão raster/vector de mapas. **Fator GIS - A Revista do Geoprocessamento**, Curitiba, n. 6, p. 16-21, jul./ago./set. 1994.
- SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicist. 1973.
- SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: uma introdução**. Curso de Geoprocessamento proferido na UFPR, Curitiba, jul. 1995.

- SOUZA, J. L.; ROCHA, H. O.; FERREIRA, F. J. F.; MANTOVANI, L. E. Anomalias aerogamaespectrométricas (K, U e Th) da região de Leme (SP) e suas relações com atividades agrícolas. *In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA* (Salvador : 1996). **Anais...** Salvador : SBG, 1996. p. 47-50.
- SOUZA, J. L.; FERREIRA, F. J. F.; ROCHA, H. O.; MANTOVANI, L. E. Soil radioactivity and its possible relationship with fertilizers in Araras region, Brazil. *In: 4th MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS* (Poços de Caldas : 1997). Edição em CDROM, Poços de Caldas : CNEN, 1997a.
- SOUZA, J. L.; FERREIRA, F. J. F.; ROCHA, H. O.; MANTOVANI, L. E. Airborne gamma-ray spectrometry and remote sensing to map uranium accumulation in soils from long-continued application of fertilizers. *In: 5th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY* (1997 : São Paulo). **Anais...** São Paulo : CISBGF, 1997b. p. 851-853.
- SOUZA, L. C. P.; ROCHA, H. O.; SOUZA, J. L. Aplicação de dados digitais, fisiográficos e geofísicos na análise de agrupamentos para fins de levantamento de solos. *In: IV CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA* (1998 : Curitiba). Edição em CDROM, Curitiba : GIS Brasil 98, 1998.
- SPALDING, R. F.; EXNER, M. E. Temporal uranium variations in the Brazos river. *In: Radioecology and Energy Resources*, p. 230-233. 1976.
- STAR, J.; ESTES, E. **Geographic information system; an introduction**. Prentice-hall, Eaglewood Cliffs, New Jersey. 1990.
- TODOROVSKY, D.; KULEV, I. On the uranium content in some technogenic products potential environmental pollutants. **J. Radioanal. Nucl. Chem.**, 1993. vol 5, p. 405-413.
- WEHR, M. R.; RICHARD JUNIOR, J. A. Física do átomo. *In: Radioatividade natural*. Departamento de Física do Drexel Institute. 1965. p. 265.
- WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n.2, p.201-216. 1997.
- ZIELINSKI, R. A.; ASHER-BOLINDER, S.; MEIER, A. L.; JOHNSON, C. A.; SZABO, B. J. Natural or fertilizer-derived uranium in irrigation drainage: a case study in southeastern Colorado, USA. **Applied Geochemistry**, v. 12, p. 9-21, 1997.